České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Diplomová práce

Úpravy modelu helikoptéry

2005 Milan Martinák

Předmluva

Už od dětství jsem se zajímal o plastikové modelářství letadel. Již v počátku mého studia na Katedře Řídicí techniky mě upoutal model vrtulníku umístěný v laboratoři K26. Vždy mě zajímaly příčiny jeho nefunkčnosti, proto jsem měl při výběru své diplomové práce jasnou volbu.

Hlavním cílem mé práce bylo analyzovat stav původního hardwaru, zjistit příčiny nefunkčnosti systému a navrhnout odstranění vad. Funkční model otevře cestu pro další výzkumnou práci spočívající v návrhu a implementaci řídicích algoritmů na nelineárním systému, který právě model představuje. Dalším neméně významným úkolem bylo vytvořit sadu ukázkových příkladů pro prezentační účely.

V průběhu projektu bylo potřeba řešit větší množství různorodých problémů, a proto na modelu současně probíhaly dvě diplomové práce. Po konzultaci s vedoucím diplomové práce jsem přesunul svou pozornost na hardwarovou část. Softwarovou problematiku řešil můj kolega Hynek Bury. Obojí zadání jsou natolik provázaná, že je nelze oddělit. Většinu činností jsem prováděl ve spolupráci s kolegou Burym a to i z důvodu bezpečnosti, jelikož práce na modelu a jeho testování vyžaduje pro zachování pravidel bezpečného provozu dva pracovníky.

Naše práce navazuje na diplomovou práci Řízení helikoptéry Ing. Pavla Beneše, Programový systém rychlé komunikace pro model helikoptéry Ing. Jaroslava Fojtíka a Řídicí systém modelu helikoptéry Ing. Pavla Krska.

Předkládaná práce je koncipována jako návod na obsluhu instalovaného systému. První dvě kapitoly se zabývají základní terminologií spojenou s řízením vrtulníku a přenosem dat. Pro snadnější pochopení problému souvisejícího s řízením modelu je čtvrtá kapitola věnována celkové koncepci řízení. Následující tři části ji pak podrobně rozvádějí. Poslední kapitola se věnuje demonstračnímu programu a vlivu okolí na činnost hardwaru. V přílohách naleznete rozšířený výklad k základním obvodům.

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Františku Vaňkovi za ochotu, technickou a finanční podporu celého projektu. Panu Ing. Jaroslavu Pekařovi, Ing. Jiřímu Roubalovi za poskytnutí cenných informací, panu Ing. Jindřichu Fukovi za poskytnutí zázemí pro klidnou práci, dále Ing. Michalu Kutilovi a Tomáši Krajníkovi za hodnotné připomínky a náměty. Mé přítelkyni Barboře Fendrichové děkuji za morální podporu, sestře Janě Martinákové za autorskou korekturu a rodičům za umožnění studia.

Milan Martinák

1 Obsah

Předmluva **1**

1 Obsah **2**

2 Model helikoptéry, principy řízení a letu **6**

2.1 Parametry modelu 6
2.1.1 Obecné informace 6
2.1.2 Funkční části vrtulníku 6
2.1.2.1 Trup modelu a pohonná jednotka 7
2.1.2.2 Hlavní a vyrovnávací rotor 7
2.1.2.3 Systémy pro řízení 8
2.1.2.4 Podvozek 8

2.2 Princip řízení vrtulníku 8
2.2.1 Síly působící na vrtulník 8
2.2.2 Cyklické a kolektivní řízení 9
2.2.3 Bell – Hillerův stabilizátor 9
2.2.4 Režimy letu 10

2.3 Souřadný systém 10
2.3.1 Transformace souřadnic mezi zemským letadlovým souř. syst. 11
2.3.2 Transformace souřadnic mezi letadlovým a aeromertickým souř. syst. 12

3 Přenos dat **13**

3.1 Teorie informace 13

3.2 Kódování 13
3.2.1 Kódová reprezentace zpráv 14
3.2.2 Elektrická reprezentace 14
3.2.3 Kódy s paritou 15

3.3 Modulace signálu 15
3.3.1 Přenos v základním a přeloženém pásmu 15
3.3.2 Modulace pro přenos analogových signálů 15
3.3.2.1 Amplitudová analogová modulace 16
3.3.2.2 Šířková impulzová modulace (PWM) 17
3.3.3 Modulace pro přenos datových signálů 17
3.3.3.1 Amplitudová modulace (ASK) 18

3.4 Přenosové cesty a přenosové kanály 18
3.4.1 Přenosové cesty 18
3.4.1.1 Elektromagnetické přenosové cesty 19
3.4.1.2 Metalické přenosové cesty 19
3.4.2 Přenosové kanály 20
3.4.2.1 Frekvenční rozdělení kanálů (FDMA) 20

3.5 Způsoby přenosu dat 21
3.5.1 Simplexní, duplexní a poloduplexní přenos 21
3.5.2 Sériový, paralelní a sérioparalelní přenos 21
3.5.3 Synchronní, asynchronní a arytmický přenos 22

4 Celková koncepce **23**

4.1 Hardwarová část 23
4.4.1 Heliport, trenažér a napájecí zdroj 23
4.1.2 Povelové řízení a sběr dat 24
4.1.2.1 Přenosový kanál pro sběr dat 24
4.1.2.2 Přenosový kanál povelového řízení 24

4.2 Softwarová část 24

5 Konstrukce trenažéru **26**

5.1 Konstrukce a poloha Heliportu v laboratoři 26
5.1.1 Mechanické provedení trenažeru 26
5.1.2 Konstrukce heliportu 27
5.1.3 Ukotvení heliportu v laboratoři 28
5.1.4 Antigravitační systém 28
5.1.5 Praktické zkušenosti s heliportem 29

5.2 Snímání polohy 29
5.2.1 Charakteristiky inkrementálních snímačů 30

5.3 Snímač otáček nosného rotoru 31

5.4 Napájecí zdroj 32
5.4.1 Konstrukce zdroje 32
5.4.2 Přívod napájení k vrtulníku 34
5.4.3 Praktické zkušenosti a provozní zkouška 34

6 Hardwarová část projektu **35**

6.1 Systém povelového řízení 35
6.1.1 Komunikace PC – Interface 35
6.1.1.1 Vstupně výstupní karta Advantech PCI - 1711 35
6.1.1.2 Vnitřní sběrnice v Interface 38
6.1.1.3 Logické propojení sběrnic 38
6.1.1.4 Propojovací kabely 39
6.1.2 RC souprava a vysílací časovače 39
6.1.2.1 Funkce sériově vyráběné RC soupravy 39
6.1.2.2 Úpravy pro řízení počítačem 40
6.1.2.3 Parametry vysílacích čítačů 41
6.1.2.4 Propojení Interface – vysílačka 43
6.1.3 Zpracování řídicího rámce 43
6.1.3.1 Odvození PWM z pátého kanálu 43
6.1.3.2 Silová část PWM 43

6.2 Systém pro sběr dat 45
6.2.1 Zpracování a přenos dat 45
6.2.1.1 Zpracování dat z IRC snímačů polohy 45
6.2.1.2 Vysílací rámec 46
6.2.1.3 Charakteristiky přenosu 47
6.2.1.4 Použité přenosové cesty 47
6.2.2 Komunikace Interface – PC 49
6.2.2.1 Vnitřní architektura v Interface 49
6.2.2.2 Komunikace z hlediska PC 50

6.3 Deska PCB No.1 ... 53
6.3.1 Stav původní desky ... 53
6.3.2 Obvodové zapojení ... 53
6.3.2.1 Obvod Xilinx ... 53
6.3.2.2 Inkremantální snímače polohy ... 53
6.3.2.3 Snímač otáček a budící obvod motoru ... 54
6.3.2.4 Napájecí zdroj desky ... 56
6.3.2.5 Připojení pátého kanálu z RC ... 56
6.3.2.6 Vysílač dat ... 56
6.3.2.7 Deska plošných spojů ... 57
6.3.3 Zdroj napájení serv a RC přijímače ... 57

7 Softwarová část projektu ... 59

7.1 Použité Toolboxy ... 59
7.1.1 Real Time Toolbox verze 2.x ... 59
7.1.2 Virtual Reality Toolbox verze 3.1 ... 59

7.2 Perioda vzorkování ... 59

7.3 Čtení a zápis dat ... 60
7.3.1 Inicializace laboratorní karty ... 60
7.3.2 Inicializace řídicích časovačů 8253 ... 61
7.3.3 Funkce pro zápis ... 61
7.3.4 Funkce pro čtení ... 61
7.3.5 Rekonstrukce absolutní hodnoty ... 62

7.4 Diagnostika a kontrola hardware ... 62
7.4.1 Test vnějších registrů ... 63
7.4.2 Test přenosových kanálů ... 63

7.5 Vizualizace virtuálního modelu ... 63

7.6 GUI aplikace ... 64
7.6.1 Informace o poloze vrtulníku ... 64
7.6.2 Ovládání servomechanizmů ... 65
7.6.3 Diagnostika ... 65
7.6.4 Vizualizace ... 66
7.6.5 Demonstrační mód ... 66

8 Ukázka letu a vliv okolí na hardware ... 68

8.1 Provozní podmínky ... 68

8.2 Řízení modelu ... 68
8.2.1 Použitá regulátor ... 68
8.2.2 Rozvrh akcí a časování ... 69

8.3 Bezpečnost při provozu ... 71

8.4 Parazitní vliv okolí ... 71
8.4.1 Rušení povelového řízení ... 71
8.4.2 Rušení sběru dat ... 71
8.4.3 Zdroje rušení ... 71
8.4.4 Praktické zkušenosti ... 71

8.4 Přechodové charakteristiky ... 72

9 Závěr **74**

10 Reference **75**

Příloha A **Čítač 8253** **76**

A.1 Hardwarový přístup 76
A.2 Softwarový přístup 76
A.3 Nastavení čítačů 77
A.4 Operace čtení/zápis 79

Příloha B **Obvody Xilinx** **81**

B.1 Logické pole Xilinx 81
B.2 Nahrávání konfigurace 81
B.3 Programování 82
B.4 Použité obvody 83
B.5 Základní zapojení 83

Příloha C **Obsah přiloženého CD** **85**

2 Model helikoptéry, principy řízení a letu

Nosné téma diplomové práce je založeno na řízení modelu helikoptéry. Z tohoto důvodu jsou v kapitole popsány základní parametry modelu, vysvětleny pojmy použité v textu a uveden souřadný systém použitý u softwarového řízení.

2.1 Parametry modelu

2.1.1 Obecné informace

Model vrtulníku vychází z továrně vyrobeného Rc modelu firmy KYOSHO typu EP Koncept. Jde o vrtulník s jedním dvoulistým nosným rotorem, který je společně poháněn s vyrovnávacím rotorem stejnosměrným elektromotorem LE MANS AP36. Pro zvýšení stability je model osazen Bell-Hillerovým stabilizátorem. Povelové řízení obstarává původně čtyřkanálová RC souprava ATTACK 4 firmy Robbe pracující v modelářském pásmu 40 MHz.

Tento model bylo potřeba upravit tak, aby vyhovoval nárokům plynoucím z požadavku řízení v reálném čase. S tím souvisí nutnost sběru dat, jejich zpracování, vyhodnocování a následné zpětné řízení vrtulníku, které obstarává počítač. Jednotlivé úpravy jsou podrobně popsány v následujících kapitolách.

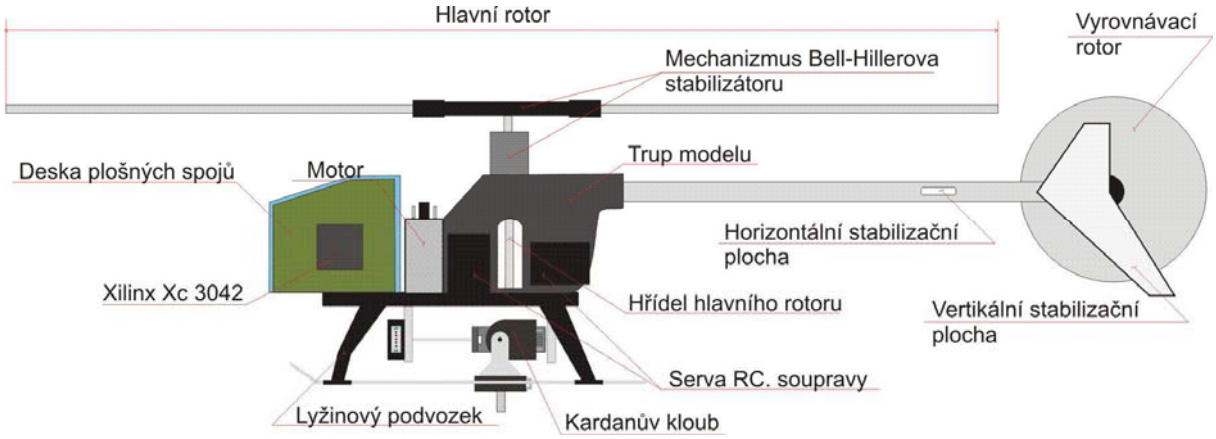
2.1.2 Funkční části vrtulníku

Nejdůležitější části vrtulníku jsou vyznačeny na obr. 2.1. Jak již bylo řečeno, typ našeho modelu je vrtulník s jedním nosným rotorem, proto se další popis týká právě této skupiny vrtulníků.

Obr. 2.1 Hlavní části vrtulníku

2.1.2.1 Trup modelu a pohonná jednotka

Drak modelu tvoří nosnou základnu sloužící k ukotvení hřídele hlavního rotoru a vyrovnávacího rotoru. V těle základny je vertikálně uložen motor s převodovým systémem pro pohon obou rotorů, ten je přes jednosměrnou spojku (cvrčkem) spojen s hřídelí hlavního rotoru. Toto řešení dovoluje v případě výpadku hnací jednotky nouzové přistání, tzv. autorotací. Vyrovnávací rotor je s převodovým ústrojím napevno spojen třmenovým převodem. Schematické uspořádání a rozměry jsou přehledně vyobrazeny viz obr. 2.2, respektive obr. 2.3.

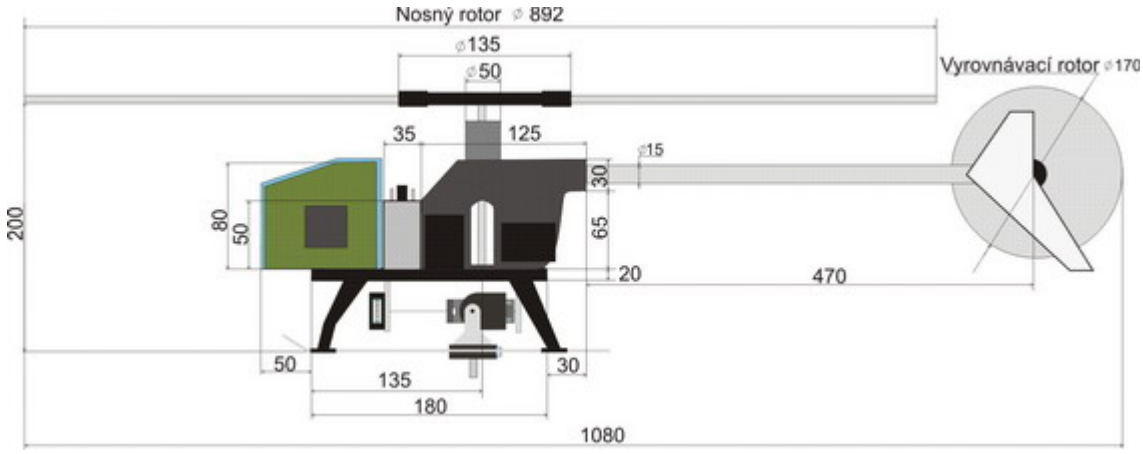


Obr. 2.2 Schematické uspořádání

2.1.2.2 Hlavní a vyrovnávací rotor

Při letu vzniká na listech nosného rotoru tah, který představuje nosnou sílu helikoptéry, a reakční moment způsobující rotaci trupu helikoptéry kolem středové osy. Pro kompenzaci tohoto momentu slouží vyrovnávací rotor.

Nosný dvoulistý rotor o průměru 892 mm je opatřen tuhými závěsy rotorových listů a pomocným řídicím rotorem Bell-Hillerova stabilizátoru, který tvoří dva krátké listy na koncích opatřené řídicími ploškami. Přes pákové mechanismy lze pomocí tří serv nastavovat cyklické i kolektivní ovládání listů rotoru. Na konci ocasu, který je tvořen duralovou trubkou o délce 470 mm a průměru 15 mm, je umístěn vyrovnávací rotor. Jeho průměr je 170 mm a je poháněn gumovým pásem procházejícím středem ocasní trubky. Listy jsou ovládány lankem spojeným s příslušným servem. Na konci ocasu jsou také umístěny vertikální a horizontální stabilizační plochy (obr. 2.2).



Obr. 2.3 Rozměry modelu

2.1.2.3 Systémy pro řízení

Řízení modelu je realizováno pomocí akčních členů tvořených čtyřmi modelářskými servy umístěnými po dvou na obou stranách vrtulníku. Řízení serva je zajištěno přes původně čtyřkanálovou RC soupravu, která byla modifikována za účelem řízení pomocí počítače v reálném čase. Celý řídicí řetězec je schematicky znázorněn v kapitole 4; podrobný popis hardwarové části řízení naleznete v kapitole 6; softwarová část je v kapitole 7.

2.1.2.4 Podvozek

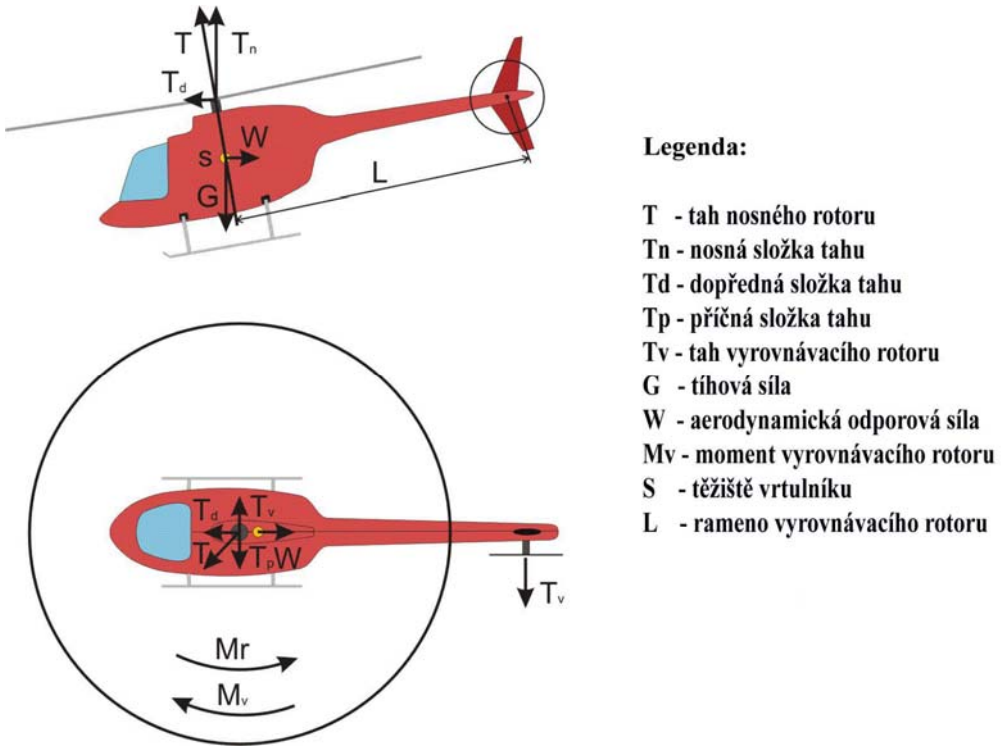
Pevný podvozek je tvořen duralovými trubičkami o průměru 4 mm, které jsou s trupem pružně spojeny plastovými pérky ve tvaru podkov.

2.2 Princip řízení vrtulníku

Helikoptéru lze ovládat změnou směru a velikostí vektoru tahu u hlavního a vyrovnávacího rotoru a změnou výkonu motoru. Změnou velikosti tahu vyrovnávacího rotoru kompenzujeme momentovou nerovnováhu způsobující rotaci vrtulníku kolem hlavní osy, změnou tahu nosného rotoru docilujeme stoupání a klesání stroje. Poslední možnost se v praxi ve větší míře nepoužívá. Výkon motoru se udržuje v oblasti nejvyšší účinnosti.

2.2.1 Síly působící na vrtulník

Během letu na vrtulník působí řada sil a momentů, které musí být akčními členy vrtulníku vhodně kompenzovány. Nejdůležitější síly působící na vrtulník jsou schematicky zobrazeny na obr. 2.4. Pro ustálený přímočarý dopředný let musí být všechny síly a momenty v rovnováze.



Obr. 2.4 Síly působící na helikoptéru při ustáleném letu

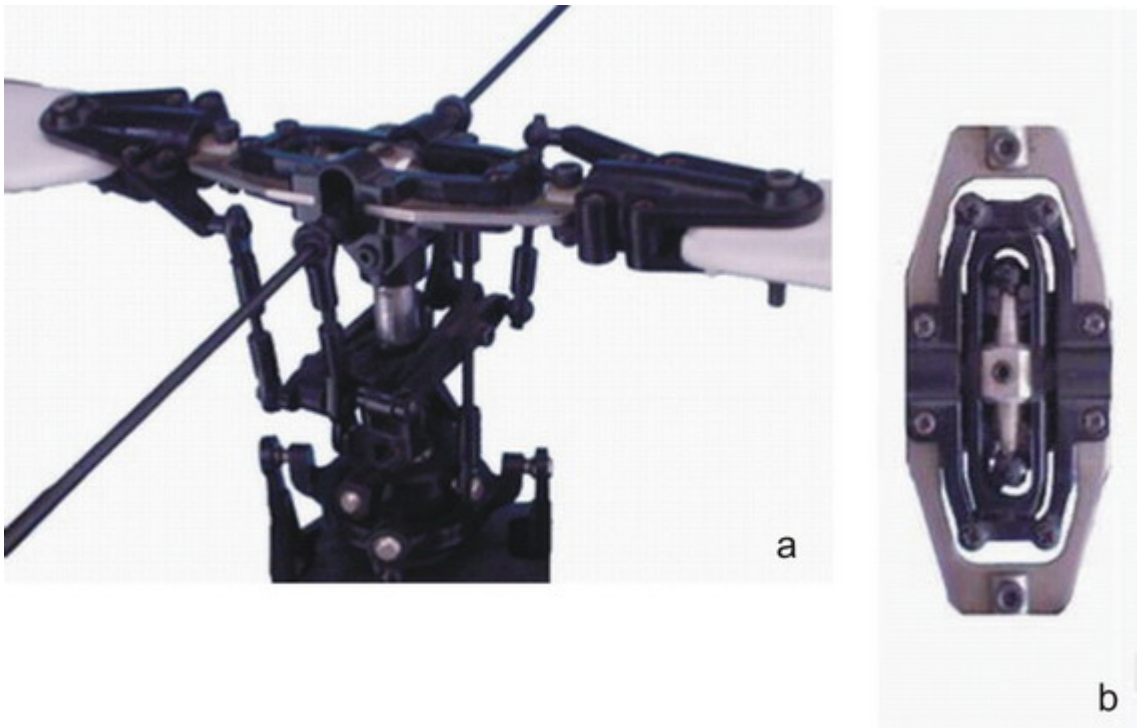
2.2.2 Cyklické a kolektivní řízení

Stoupání a klesání stroje docilujeme společným nastavením náběhu všech listů u hlavního rotoru. Tento způsob řízení se nazývá kolektivní řízení (obr. 2.5).

Cyklickým řízením ovlivňujeme náběh listů v průběhu jedné otáčky, čímž vzniká síla, která naklání celý vrtulník jak v podélné, tak v říčné ose. Osa náklonu je dána místem, kde se v otáčce hlavního rotoru mění úhel náběhu listů. Podélným naklopením roviny nosného rotoru se nakloní i vektor tahu T a vytvoří se dopředná složka tahu T_d, která způsobí posuvný pohyb vrtulníku. Příčným naklopením vektoru tahu T vnikne síla T_p kompenzující silu T_v od vyrovnávacího rotoru, která způsobuje nežádoucí náklon vrtulníku (obr. 2.4).

2.2.3 Bell-Hillerův stabilizátor

Z důvodu přirozeně špatné stability helikoptéry během většiny letových režimů jsou vrtulníky vybaveny stabilizátory, jejichž úkolem je tlumit naklánění vektoru tahu nosného rotoru. Jsou umístěny mezi pilota a cyklické řízení. Z mechanických stabilizačních systémů je nejznámější Bell–Hillerův. Podstata spočívá v použití mechanického setrvačníku a pomocných řídicích plošek, kterými je vybaven hlavní rotor (obr. 2.5).



Obr. 2.5 Mechanika cyklického a kolektivního řízení a Bell-Hillerova stabilizátoru (a – boční pohled, b – horní pohled)

Poznámka: Řízení vrtulníku je obecně v porovnání s řízením letadla velmi náročný úkol. Oba způsoby řízení jsou si podobné pouze při rychlém dopředném pohybu helikoptéry. Tento režim bohužel není možný z důvodů upoutání vrtulníku.

2.2.4 Režimy letu

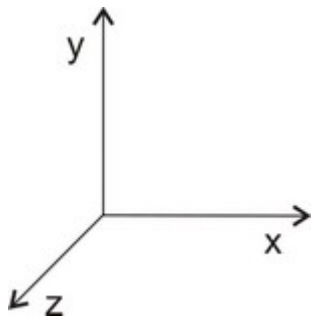
Použitý model využívá všech výše popsaných prvků řízení a umožňuje vzhledem k použití trenažéru (viz kapitola 5) následující letové režimy:

- **Vzlet:** při plném výkonu motoru zvyšujeme natočení listů hlavního rotoru a tím i jeho tah směrem vzhůru vzrůstá, čímž vrtulník vzlétá. Podstatný je v tomto letovém režimu vliv tzv. přízemního jevu (odlišné proudění vzduchu v blízkosti země). V našem případě lze přízemní jev vzhledem k použití trenažéru, který je umístěn nad zemí, zanedbat.
- **Visení:** vrtulník setrvává na jednom místě a udržuje si konstantní výšku. Tento způsob letu spolu s režimem otáčení ve vodorovné poloze by měl vzhledem k možnostem modelu a trenažéru představovat nejčastější úlohu regulace.
- **Otáčení ve vodorovné poloze:** jedná se o režim, při kterém je vrtulník ve vodorovné poloze a řízením tahu vyrovnávacího rotoru rotuje kolem osy hlavního rotoru. V počátečních fázích návrhu regulátorů lze usnadnit řízení v tomto režimu částečnou fixací vodící tyče, čímž se výrazně zlepší stabilita modelu.
- **Přímý let a let do stran:** pomocí změny cykliky přejde vrtulník do pohybu ve směru náklonu. Rychlost letu je určena mírou náklonu a délka dráhy letu je omezena rozměry vodící tyče, proto je tento letový režim možný pouze po krátké dráze.
- **Plynulá zatáčka během letu:** provádí se z režimu přímého letu při současné změně cykliky a tahu zadní vrtule. Konstrukce trenažéru umožňuje v tomto režimu především pohyb po kruhové trajektorii.
- **Přistání:** operace opačná ke startu modelu. Také zde by se mohl, v případě větší přistávací plošiny, uplatňovat přízemní jev.
- **Přistání autorotací:** tato možnost je obdobou nouzového přistání u letadel a používá se v případě vysazení motoru. Vzhledem k tomu, že pro tuto operaci je potřeba určitá výška, nelze ji s ohledem na délku vodící tyče trenažéru vyzkoušet.

2.3 Souřadný systém

Pro navigaci vrtulníků se v praxi používá souřadná soustava odvozená od kartografické soustavy poledníků a rovnoběžek. V této soustavě je poloha popsána zemskou délkou, šířkou a výškou nad povrchem, tudíž se zde zcela oprávněně bere v úvahu zakřivení zemského povrchu.

V našem případě, kdy studujeme dynamiku a řízení letu na malém prostoru, je zbytečné při výpočtech uvažovat zaoblení země. Vzniklá chyba je zanedbatelná. Z těchto důvodů používáme pro popis polohy modelu pravoúhlou souřadnou soustavu podle normy Gost. Její orientace viz obr. 2.6.



Obr. 2.6 Norma Gost

Pro popis letu vrtulníku používáme tři navzájem provázané souřadné systémy:

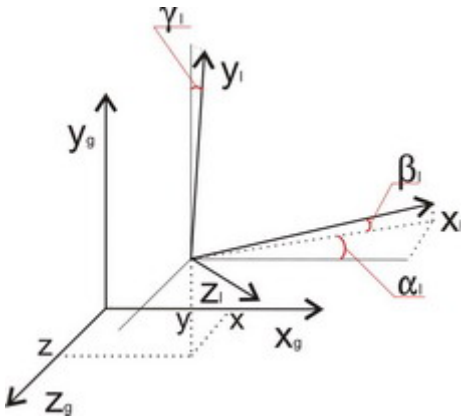
- **Zemský souřadný systém:** v tomto případě je rovina x_g, z_g rovnoběžná s vodorovným povrchem země a je umístěna na přistávací ploše heliportu tak, že počátek souřadné soustavy je ve středu kruhové desky a osa z_g je rovnoběžná se spodní částí nosné konstrukce heliportu. Osa y_g pak odpovídá výšce nad plochou heliportu.
- **Letová soustava souřadnic:** počátek souřadné soustavy je umístěn v těžišti vrtulníku, osa x_l je orientovaná od zádě k přídi, osa y_l směřuje kolmo vzhůru a osa z_l vytváří pravotočivou souřadnou soustavu.
- **Aerometrická souřadná soustava:** je závislá na vektoru vzduchu obtékajícího vrtulník. Osa x_a je orientovaná vodorovně s vektorem vzduchu; její orientace je však opačná. Osy y_a, z_a jsou orientovány k ose x_a stejně jako u letadlové souřadné soustavy.

Při znalosti transformačních vztahů mezi jednotlivými soustavami souřadnic můžeme přepočítat polohu objektu v soustavě jedné do soustavy druhé. Toho využíváme při výpočtu polohy vrtulníku a ve vizualizační části (kapitola 7). Postup vytváření transformačních matic vychází z Heidelbergovy notace.

2.3.1 Transformace souřadnic mezi zemským a letadlovým souř. syst.

Transformace udává obecnou polohu vrtulníku v prostoru vztaženou k zemské soustavě souřadnic. Poloha letadla je obecně udávána šesti parametry:

- x_l, y_l, z_l **poloha vzhledem k těžišti vrtulníku**
- α_l **kurz vrtulníku** (osa rotace y_l)
- β_l **podélný náklon** (osa rotace z_l)
- γ_l **příčný náklon** (osa rotace x_l)



Obr. 2.7 Transformace souřadnic zemský - letadlový souř. syst.

Transformace z letadlového souřadného systému v homogenních souřadnicích do zemského souřadného systému v homogenních souřadnicích je dán vztahem:

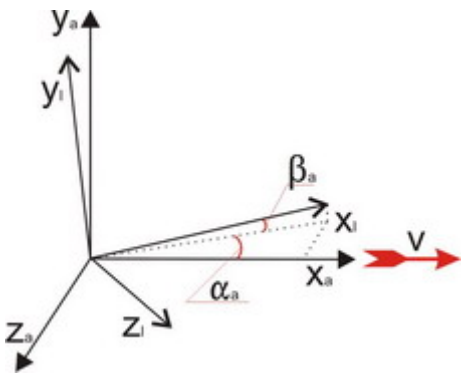
$$x_g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & x \\ 0 & 0 & 0 & y \\ 0 & 0 & 0 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha_l & 0 & -\sin\alpha_l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin\alpha_l & 0 & \cos\alpha_l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta_l & -\sin\beta_l & 0 & 0 \\ \sin\beta_l & \cos\beta_l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma_l & -\sin\gamma_l & 0 \\ 0 & \sin\gamma_l & \cos\gamma_l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x_l \quad (2.1)$$

kde $x_l = [x_l \quad y_l \quad z_l \quad 1]^T$ a $x_g = [x_g \quad y_g \quad z_g \quad 1]^T$

2.3.2 Transformace souřadnic mezi letadlovým a aerometrickým souř. syst.

Vztah mezi těmito soustavami vyjadřuje aerodynamické podmínky za letu vzhledem k letounu. Aerodynamická soustava se popisuje pouze třemi parametry. Z tohoto důvodu není transformace úplná, jak je tomu v předešlém případě. Parametry aerometrické soustavy jsou:

- β_l **úhel náběhu:** úhel svíraný vektorem vzdušné rychlosti s osou letadla x_l v rovině symetrie x_l, y_l,
- α_a **úhel vybočení:** úhel dán vektorem vzdušné rychlosti s osou x_l v rovině křídel x_l, z_l,
- v_l **vzdušná rychlost:** absolutní hodnota rychlosti letounu vůči okolnímu vzduchu.



Obr. 2.8 Transformace souřadnic letadlový - aerometrický souř. syst.

Rovnice popisující vztah letadlové a aerometrické souřadné soustavy v homogenních souřadnicích:

$$x_a = \begin{bmatrix} \cos\alpha_a & 0 & -\sin\alpha_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin\alpha_a & 0 & \cos\alpha_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta_a & -\sin\beta_a & 0 & 0 \\ \sin\beta_a & \cos\beta_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x_l \tag{2.2}$$

kde $x_l = [x_l \quad y_l \quad z_l \quad 1]^T$ a $x_a = [x_a \quad y_a \quad z_a \quad 1]^T$

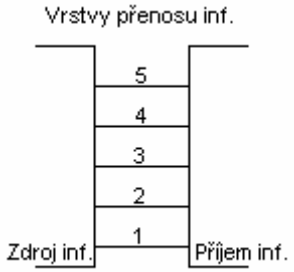
3 Přenos dat

Důležitou součástí řídicích a měřících systémů je přenosová cesta, která zajišťuje přenos údajů mezi jednotlivými systémy. Pro realizaci přenosu se používá celá řada přenosových médií. V Hardwarové části řízení a sběru dat jsou použity dva typy přenosových cest, z tohoto důvodu se v kapitole zaměřím na objasnění terminologie s nimi spojenou. Bezdrátová přenosová cesta je použita u povelového řízení, elektromagnetická cesta realizuje přenos dat z modelu helikoptéry do PC.

3.1 Teorie informace

Teorie informace analyzuje problematiku přenosu dat včetně poruch, parametrů kanálů i přenášeného signálu, definuje kvantitativní míru informace. Základní myšlenkou teorie informace je způsob sběru, přenosu a zpracování informace.

Základy teorie informace definoval C. E. Shannon.Podle teorie lze přenos informace rozdělit do pěti vrstev (obr. 3.1) :



Obr. 3.1 Vrstvy přenosu informace

- 1. vrstva – statistická: Shannonova teorie používá statistické zpracování. Dovoluje popisování vlastností informačních znaků a jejich kvalifikaci.
- 2. vrstva – Syntaktická: řeší se následující problémy:
  - jaké soubory symbolů jsou nadefinovány,
  - jaké soubory jsou definovány pro jednotlivé vrstvy,
  - jak jsou slova řazena do vět.
- 3. vrstva – sémantická: informace se může přenášet různými médii, podle nichž se volí typy kódů.
- 4. vrstva – pragmatická: řeší způsob řízení přenosu informace mezi vysílačem a přijímačem.
- 5. vrstva – apoetická: vrstva je nejvyšší, zajišťuje cíleně orientované programové vybavení.

3.2 Kódování

Kódováním můžeme nazvat přiřazení stavu prvků jedné množiny (zprávy) stavu prvků druhé množiny (signálu). Z hlediska přenosu zpráv nám kódování definuje jak elektrickou reprezentaci, tak přizpůsobení signálu přenosovému kanálu, zlepšení synchronizačních vlastností, ale na vyšší úrovni i zabezpečení proti chybám a zneužití dat. Zprávu kódujeme v kodéru, který je umístěn na straně vysílače. Na straně přijímače je dekodér, jenž sadě znaků kódované zprávy přiřadí sadu znaků původní zprávy. Pokud je zpráva zabezpečena korekčním kódem, může být dekodérem při chybně přijaté zprávě provedena oprava v rámci zabezpečení. Ke kódování se používá velká řada kódů, které mají různé vlastnosti, proto je obvyklé používat vícenásobné kódování, přičemž je zpráva například nejdříve zabezpečena proti chybám a poté upravena pro přenos.

3.2.1 Kódová reprezentace zpráv

Při kódování musíme vycházet z množiny prvků zdroje zpráv, kterým kodér přiřazuje prvky množiny přenosového systému. Aby kódování bylo jednoznačné, musí být množina prvků zdroje zpráv menší nebo rovna množině prvků kodéru.

Celkový počet kódových slov **L** vypočteme podle vztahu (3.1), kde **n** je délka kódového slova a **m** je počet prvků v příslušné abecedě.

$$L = m^n \tag{3.1}$$

Podle objemu abecedy kódu m rozeznáváme dvoustavové (m = 2), třístavové (m = 3) a vícestavové kódy (m > 3). V dnešní době se používá dvoustavový nebo vícestavový kód. Potřebný počet slov se dosahuje změnou délky kódového slova.

Podle počtu prvků v kódové kombinaci dělíme kódy na:

- **Jednoprvkové kódy**: kódové slovo obsahuje pouze jeden prvek. Používají se v řízení a snímání s málo stavy.
- **Víceprvkové kódy**: kódové slovo má více prvků, nejvíce se používají kódy se dvěma stavy (binární). Binární kódy přímo reprezentují data v počítači.

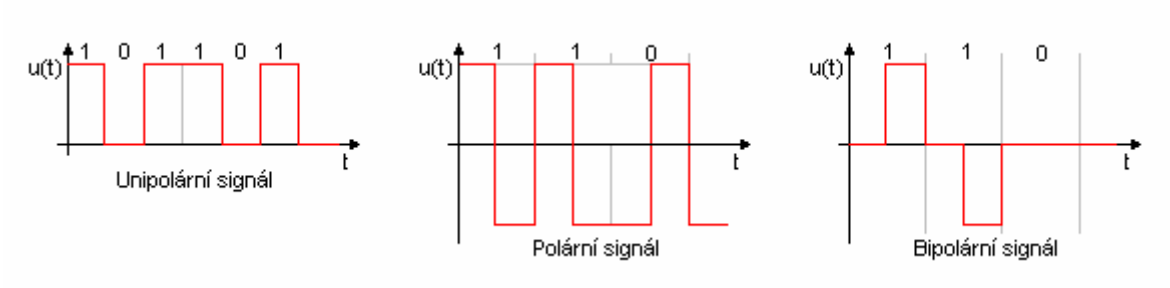
Podle délky kódových skupin dělíme kódy na:

- **Nerovnoměrné kódy**: jsou charakterizovány různou délkou kódových skupin. Jsou navrženy tak, aby přenos byl maximálně efektivní. Nejpoužívanější znaky mají nejkratší délky. Jejich nevýhodou je složitější detekování.
- **Rovnoměrné kódy**: vyznačují se rovnoměrnou délkou kódových skupin. Na úrovni přenosového kanálu se vždy využívá tohoto kódu a komprese se nechává na vyšší úrovni kódování zpráv.

3.2.2 Elektrická reprezentace

Z hlediska přenosu údajů je důležitá elektrická reprezentace signálů, a to především signálů binárních. Podle typu elektrického signálu mluvíme o:

- **Unipolární signál:** jde o signál jedné polarity, označovaný také jako signál RZ (return to zero). Používá se při přenosech na krátké vzdálenosti. Nevýhodou těchto signálů je velikost stejnosměrné složky.
- **Polární signál:** signál obsahuje pouze kladnou nebo zápornou polaritu, proto se nazývá NRZ (Non Return to Zero). Střídáním kladné a záporné polarity se výrazně potlačí stejnosměrná složka. Nevýhodou je potřeba většího přenosového pásma a nutnost vložení synchronizační informace.
- **Bipolární signál:** kombinuje výhody předchozích signálů. Používají tři napěťové úrovně (kladná, nulová a záporná amplituda).



Obr. 3.2 Typy elektrických signálů

3.2.3 Kódy s paritou

Patří mezi detekční kódy systematické. Ty se vyznačují přesně definovanou informační částí přenášeného bloku (rámce) a částí zabezpečovací. Ochrana paritou je velmi jednoduchý a často využívaný způsob zabezpečení.

Vlastní zabezpečení kódového slova vzniká tak, že každý k-prvkový soubor se doplní jedním prvkem, aby počet prvků log1 byl sudý nebo lichý. Hovoříme tak o sudé nebo liché paritě. Pro sudou paritu platí, že součet bitů mod 2 všech prvků včetně paritního je 0, pro lichou je mod 2 = 1. Paritou lze detekovat pouze lichý počet chyb. Oprava probíhá opětovným posláním chybné zprávy.

Výhodou zabezpečení s paritou je jednoduchost řešení kodéru, dekodéru a možnost zabezpečit libovolně dlouhou skupinu prvků.

3.3 Modulace signálu

3.3.1 Přenos v základním a přeloženém pásmu

Bezdrátové přenosové cesty většinou nedovolují přenášet signál v základním pásmu, které generuje zdroj signálu. Důvodem je požadavek na využití více přenosových kanálů, případně technické problémy s přenosem v některých frekvenčních oblastech. Modulaci používáme právě v těch případech, kdy není možné přenést signál v základním pásmu. Signál ze zdroje (modulační signál) vstupuje společně s nosným signálem do modulátoru. Modulačním signálem jsou v modulátoru řízené některé parametry (frekvence, amplituda, …) nosného signálu. Výsledkem modulace je transformace frekvenčního pásma signálu, kde po potlačení základního pásma vznikne signál v přeloženém pásmu (modulovaný signál). Inverzní úloha se řeší v demodulátoru, který z přijatého modulovaného signálu zrekonstruuje signál modulační.

Přenosu v přeloženém pásu se hojně využívá i v metalických přenosových cestách, kde umožňuje vytvořit více přenosových kanálů.

Rozeznáváme modulaci pro přenos analogových a digitálních signálů. Ke každému typu uvedu pro názornost jednu metodu.

3.3.2 Modulace pro přenos analogových signálů

Analogovým signálem rozumíme signál spojitý v čase i amplitudě. Tímto signálem je modulován nosný signál, který může být harmonický nebo impulzní. Impulzní modulace se hojně využívají v řídicí a měřící technice.

Modulační signál mění u nosného signálu některý z jeho parametrů (amplituda, frekvence, fáze, šířka pulzu). Mluvíme tak o amplitudové, frekvenční, fázové a šířkové modulaci. První tři způsoby se využívají u modulace analogové i impulzní. O šířkové modulaci mluvíme v souvislosti s impulzní modulací.

Samostatnou kapitolou tvoří modulace zajišťující číslicové kódování analogových signálů a jeho digitální přenos. Mezi tyto druhy modulace patří například impulzová kódová modulace nebo delta modulace.

3.3.2.1 Amplitudová analogová modulace

Nosným signálem je harmonický signál, u kterého modulačním signálem měníme amplitudu.V modulátoru se provádí prostý součin modulačního a nosného signálu. Násobením signálů dostaneme ve frekvenční oblasti posunutí spektra modulačního kolem frekvence nosné (obr.3.3). Tomuto případu se říká lineární modulace.

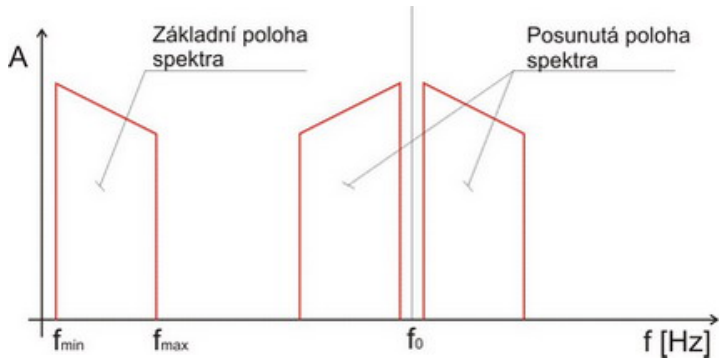
Princip amplitudové modulace lze vyjádřit vztahem:

$$a_A(t) = \left[A + \Delta A \frac{x(t)}{Xm} \right] \cos(\omega_0) = A[1 + m_A g(t)] \cos(\omega_0) \qquad (3.2)$$

kde: $a_A(t)$ je amplitudově modulovaný signál

$a(t)$	nosný signál, pro AM platí $a(t) = A\cos(\omega_0 t)$
$x(t)$	modulační signál
A	amplituda nosného signálu
ΔA	maximální změna amplitudy nosného signálu
Xm	maximální hodnota modulačního signálu
m_A	činitel amplitudové modulace ($m_A = \Delta A / A$)
$g(t)$	normovaný modulační signál $x(t)$ $g(t) = x(t) / Xm$

Popsaný amplitudově modulovaný harmonický signál $a_A(t)$ zaujímá frekvenční pásmo dané dvojnásobkem maximálního kmitočtu frekvenčního spektra modulačního signálu. Výkon signálu je rozdělen tak, že rozhodující část připadá na složku s kmitočtem nosného signálu a menší část zbývá na obě postranní pásma. Vzhledem k tomu, že nosný signál nenese žádnou informaci je toto rozdělení značně nevýhodné.



Obr. 3.3 Frekvenční pásmo amplitudové modulace

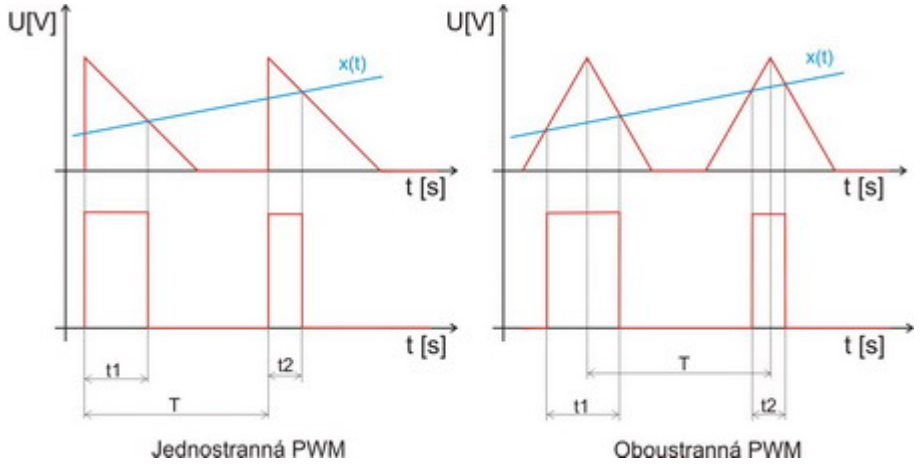
Snahy o zlepšení výkonové bilance a zúžení potřebného frekvenčního pásma vedly k různým variantám amplitudové modulace. Mezi důležité zástupce patří modulace DSB (double side band), při ní jsou plně vysílaná postranná pásma při potlačené nosné. Za cenu složitější modulace a následně demodulace lze potlačit i druhé postraní pásmo, které nese stejnou informaci jako pásmo první. Této modulaci se říká modulace SSB (single side band). Je jedno, které postraní pásmo je potlačeno. Při demodulaci je to třeba zohlednit. V obou případech je potlačená nosná, je nutno však podotknout, že 100% potlačení nosné nikdy nenastane.

3.3.2.2 Šířková impulzová modulace (PWM)

Jedná se o analogovou impulzovou modulaci. Impulzová modulace převádí spojitý analogový signál na signál diskrétní ve tvaru sledu pulzů. Jejich charakteristické parametry se mění příslušným typem modulace. Impulzové modulace jsou odolnější proti vlivu rušení; je to vykoupeno nutností přidělení větší šířky přenášeného frekvenčního pásma přenosového kanálu.

U PWM modulací měníme pouze šířku impulzů; jejich amplituda, frekvence a fáze zůstává zachována. Pokud se šířka pulzu mění jednostranně vzhledem k určujícímu bodu, jedná se o jednostrannou PWM. Při oboustranné šířkové modulaci se šířka pulzu mění symetricky oproti určujícímu bodu (obr. 3.4).

PWM modulace se s výhodou používá k přenosu stejnosměrných signálů a signálů s nízkým kmitočtem, a to často ve spojení s některou ze základních modulací. Takové modulaci, kdy je modulovaný signál použit jako modulační signál v jiné modulaci, se říká vícenásobná modulace.



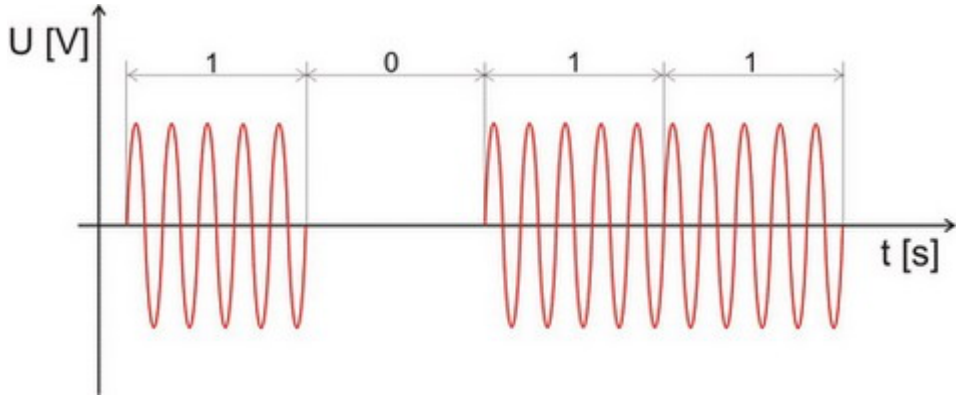
Obr. 3.4 PWM modulace

3.3.3 Modulace pro přenos datových signálů

Modulace pro přenos číslicových dat jsou odvozeny od analogových modulací. Daty v tomto kontextu rozumíme především binární soubory, proto výše uvedená modulace je vhodná pro přenos sériových dat. V praxi je možný přenos binárních dat buď přímo tzv. intenzivní metodou, nebo pomocí modulace. V bezdrátové přenosové cestě je intenzivní způsob přenosu prakticky nemožný, proto se využívá některá z modulací.

3.3.3.1 Amplitudová modulace (ASK)

Amplitudová modulace patří mezi nejjednodušší druhy modulací pro přenos číslicového signálu. Harmonický nosný signál je amplitudově modulován datovým signálem, který nabývá diskrétních hodnot (pro binární signál obvykle log0 a log1). V praxi je rozšířené tzv. dvoustavové kódování – – signál je, signál není. Podle typu logiky tyto stavy odpovídají log1 a log0. Jde o ASK s hloubkou modulace 100 %. Její největší výhoda je jednoduchost modulace i detekce (demodulace) na přijímací straně. Náchylnost k poruchám je její největší slabinou. Zlepšení odolnosti se dociluje použitím menší hloubky modulace, při které nedochází k přerušení signálu. Z pohledu detekce je však tato metoda méně výhodná. I přes malou odolnost proti rušení se ASK pro svou jednoduchost často využívá.



Obr. 3.5 Amplitudová modulace ASK

Frekvenční spektrum ASK odpovídá frekvenčnímu spektru radioimpulzu. Pro přenos je potřeba přibližně $\Delta F = 2/\tau$, kde τ je délka nejkratšího přenášeného impulzu.

3.4 Přenosové cesty a přenosové kanály

Pod pojmem přenosová cesta definujeme fyzikální prostředí, ve kterém se uskutečňuje přenos údajů nebo zpráv pomocí měronosné veličiny. Měronosná veličina je materiálním nosičem přenášené zprávy v prostoru a čase, tedy libovolná fyzikální veličina, jejíž informační parametr se v čase mění souhlasně s přenášenou zprávou. Pro efektivnější využití přenosové cesty členíme časovou i frekvenční oblast do několika částí. Každou takovou částí můžeme přenášet jednu měronosnou veličinu. Takový frekvenční nebo časový segment nazýváme přenosovým kanálem.

Z fyzikálního hlediska přenosová cesta a přenosový kanál spolu úzce souvisí. Z hlediska uživatele je přenosová cesta nezajímavá, uživatele zajímají pouze parametry přenosových kanálů, jako je šířka přenosového pásma, možnosti rušení atd.

3.4.1 Přenosové cesty

Fyzikální prostředí přenosových cest dělíme podle použitého média, frekvenčního pásma a charakteru prostředí. Z pohledu této práce je nejzajímavější metalická přenosová cesta a elektromagnetická přenosová cesta.

3.4.1.1 Elektromagnetické přenosové cesty

Elektromagnetické přenosové cesty zajišťují přenos informace bez přímého propojení metalickým nebo optickým kabelem. K přenosu jsou využívány elektromagnetické vlny. Přenosová cesta je vytvářena v prostoru mezi vysílací a přijímací anténou. Vyzářená energie je vázána na elektromagnetické pole vytvořené v prostoru vysílací antény.

Šíření elektromagnetických vln je závislé na délce vlny a prostředí, kterým vlna prochází. Parametry prostředí jsou nepravidelné a také náhodné. Elektromagnetické cesty pro bezdrátový přenos se dělí podle použitého frekvenčního spektra (obr. 3.6, obr. 3.7).

V automatizačních systémech se užívá telemetrických systémů pro sběr dat v pásmu VKV (30 – 200 MHz). Zvláštní kapitolu zaujímají družicové spoje, které se s rozvojem techniky stále více prosazují. Nejvíce se používá přenosové pásmo KU, pro které je vyhrazeno pásmo 14 GHz pro přenos k satelitu a pásmo 12 Ghz pro přenos zpět.

3.4.1.2 Metalické přenosové cesty

Metalické přenosové cesty jsou nejčastějším přenosovým médiem pro přenos měronosných signálů. Pro měřící a řídicí systémy využíváme celé spektrum metalických přenosových cest, ať jsou to koaxiální kabely, nebo kroucené dvoulinky pro přenos na dlouhé vzdálenosti nebo rovné vodiče hodící se pro střední a krátké vzdálenosti.

Každá metalická přenosová cesta je charakterizovaná tzv. primárními parametry vztaženými na jednotku délky:

- Odporem $R_0 \left[\Omega / km\right]$
- Indukčností $L_0 \left[H / km\right]$
- Kapacitou $C_0 \left[F / km\right]$
- Vodivostí $G_0 \left[S / km\right]$

Z primárních parametrů lze vypočítat vlnovou impedanci Z_o (3.3) a měrnou míru přenosu γ (3.4). Hodnota α u měrné míry přenosu udává poměrný útlum charakterizující zmenšování amplitudy signálu v závislosti na vzdálenosti od počátku vedení. Imaginární část β určuje poměrný fázový úhel. Pomocí poměrného fázového úhlu a úhlové frekvence ω určíme fázovou rychlost $v_f = \omega / \beta$.

$$Z_o = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \tag{3.3}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{\left(R_0 + j\omega L_0\right) + \left(G_0 + j\omega C_0\right)} \tag{3.4}$$

Útlum na celé délce vedení vypočítáme vynásobením poměrného útlumu α délkou vedení. Stejným způsobem určíme i fázový rozdíl. Abychom dosáhli efektivního přenosu, musíme výstupní impedanci zdroje signálu přizpůsobit vstupní impedanci vedení. Totéž platí na straně přijímače.

3.4.2 Přenosové kanály

V mnoha reálných aplikacích je ekonomicky nevýhodné používat pro každá spojení mezi vysílačem a přijímačem jednu přenosovou cestu. Využíváme proto jednu kvalitní přenosovou cestu se současným vícenásobným využitím; to vede k vytvoření přenosových kanálů.

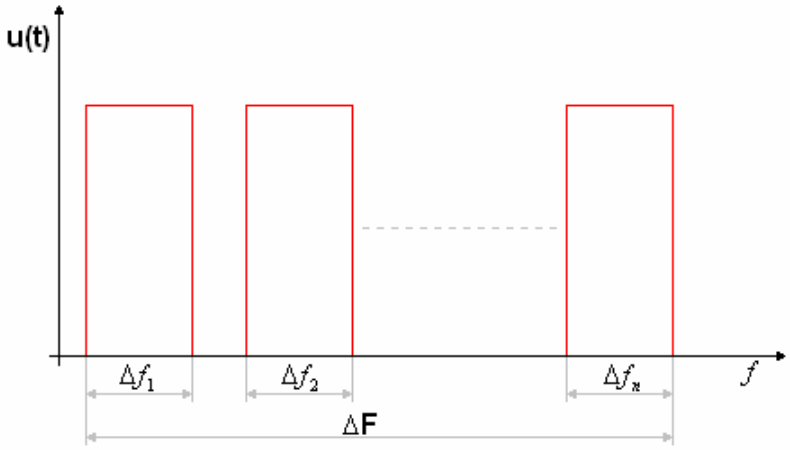
Princip umožňující při přenosu signálů používat přenosové kanály se nazývá sdružování. Technické zařízení, které sdružuje signály do jednoho, se nazývá multiplextor. Demultiplextor rozděluje přijatý signal z multiplextoru na jednotlivé složky.

Při používání bezdrátové cesty lze pohlížet na okolní prostředí jako na jednu přenosovou cestu, která je frekvenčně rozdělená na jednotlivé přenosové kanály.

Rozdělení přenosové cesty na jednotlivé kanály lze realizovat mnoha způsoby. Mezi nejpoužívanější patří časové a frekvenční dělení, které má, jak jsem již zmínil, uplatnění u bezdrátového přenosu.

3.4.2.1 Frekvenční rozdělení kanálů (FDMA)

Při frekvenčním rozdělení kanálů jsou jednotlivým signálům navzájem přiřazena nepřekrývající se frekvenční pásma $\Delta f_1, \Delta f_2$ až Δf_n. Spektra přenášených signálů $u_k(t)$ příslušných kanálů nesmí překročit stanovené meze Δf_k. Počet kanálů n se stanoví podle šířky spektra přenosové cesty ΔF a požadované šířky jednotlivých kanálů Δf s příslušnou frekvenční rezervou mezi dvěma sousedícími kanály, která potlačuje přeslechy mezi sousedními kanály (obr.3.6). V praxi se však překrývání pásem běžně vyskytuje.



Obr. 3.6 Přiřazení frekvenčních spekter jednotlivým kanálům

Signál, který chceme přenášet v k kanálu, upravujeme frekvenční nebo amplitudovou modulací na nosnou frekvenci, která je v polovině frekvenčního rozsahu k kanálu.

Obr. 3.7 Frekvenční kanály na časové ose

Velkou výhodou frekvenčního dělení kanálů je možnost současného vysílání signálů patřících různým kanálům. Jednotlivé vysílače a přijímače nemusí být při tom soustředěny na jednom místě, ale mohou být připojeny na jakémkoliv místě přenosové cesty. Nedostatkem je vzájemný vliv kanálů, který vzniká překrýváním spekter signálů, které zasahují do sousedního pásma.

3.5 Způsoby přenosu dat

Oddíl poskytuje základní přehled terminologie používané v přenosu dat u povelového řízení modelu helikoptéry a sběru dat.

3.5.1 Simplexní, duplexní a poloduplexní přenos

- **Simplexní přenos** – přenos dat a řídicích znaků je realizován pouze jedním směrem. Tím odpadá možnost zpětného potvrzení přijatých dat. Datový spoj je jednosměrný, nevyžaduje dva přenosové kanály. Simplexní přenos je vhodný pro sběr dat.
- **Poloduplexní přenos** – přenos dat a řídicích signálů ve směru od vysílače k přijímači je shodný se simplexním přenosem. V opačném směru se po samostatném kanálu přenáší řídicí signály.
- **Duplexní přenos** – je charakterizován tím, že přenos probíhá oběma směry současně. Přenosové kanály jsou využívány pro přenos dat a řídicích signálů současně. Tím dosáhneme velký přenosový výkon.

3.5.2 Sériový, paralelní a sérioparalelní přenos

Podle způsobu přenosu jednotlivých bitů v kódových skupinách rozlišujeme sériový přenos na:

- **Sériový přenos** – jednotlivé bity jsou v časové oblasti přenášeny postupně. Díky této vlastnosti stačí pro uskutečnění přenosu jeden přenosový kanál.
- **Paralelní přenos** – všechny bity kódového slova jsou přenášeny současně. Pro každý bit je potřeba samostatný přenosový kanál.
- **Sérioparalelní přenos** – jde o kombinaci předchozích způsobů.

3.5.3 Synchronní, asynchronní a arytmický přenos

Na přenášená data působí v komunikačních kanálech vlivy způsobené nedokonalostí vedení (útlum, zpoždění) a rušením od okolí. Přenášený signál je na přijímací straně těmito vlivy zkreslen. Proto je pro přijímač při přijímání posloupnosti bitů problematické rozpoznat začátek a konec této sekvence a správně detekovat jednotlivé bity v optimálních intervalech.

Z hlediska synchronizace rozlišujeme přenos na:

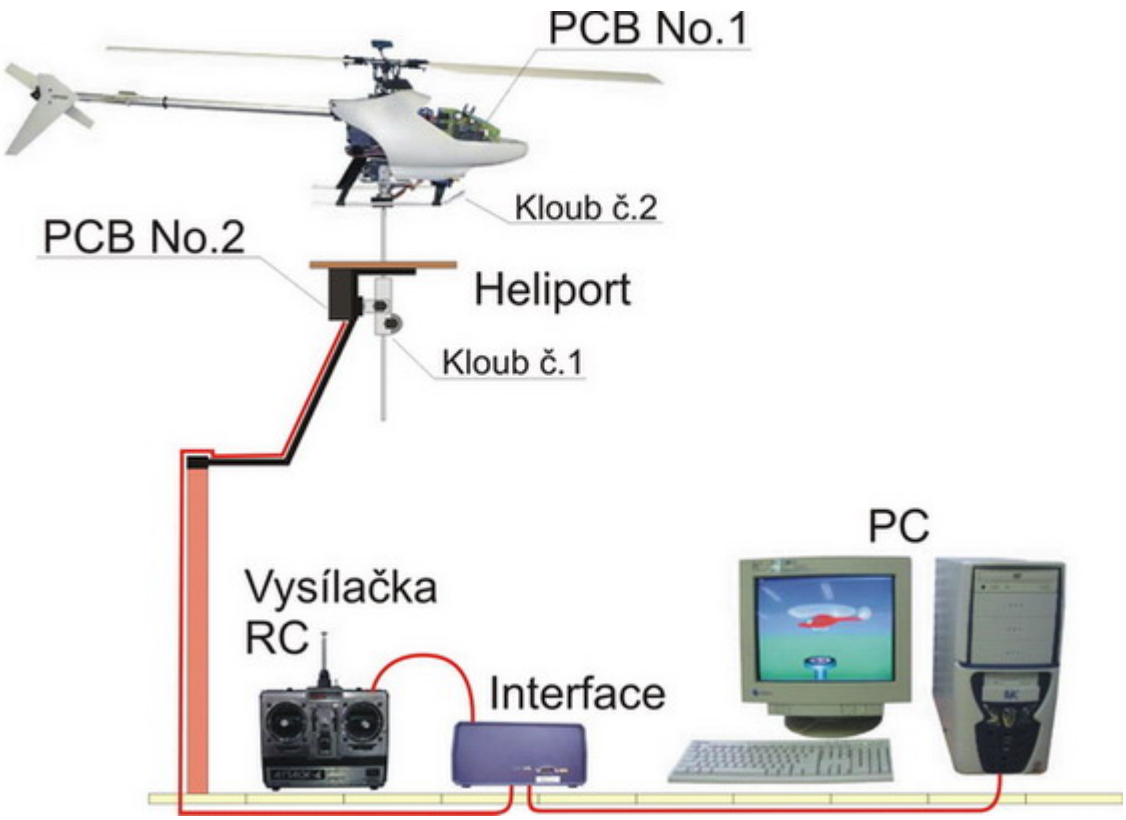
- **Synchronní přenos** – přijímač a vysílač pracuje u tohoto druhu přenosu synchronně. Pojem synchronizace v tomto případě představuje nastavení dvou signálů do žádané vzájemné polohy. Toho je dosahováno tzv. synchronizačním signálem, který je generován na straně vysílače. K přijímači musí být přenášen zvláštním přenosovým kanálem nebo je tento synchronizační signál odvozen od jiného časového rastru, který má k dispozici jak přijímač, tak vysílač.
- **Asynchronní přenos** – sled vysílaných a přijímaných dat není časově vázán. Rozpoznání posloupnosti sledu několika bitů shodné úrovně je obtížný, proto se tento přenos prakticky nepoužívá.
- **Arytmický přenos** – jde o kombinaci předchozích dvou způsobů. Jednotlivé bloky zpráv jsou přenášeny asynchronně. Po detekci začátku bloku na přijímací straně dojde díky synchronizační informaci, kterou musí každý blok obsahovat, k synchronizaci mezi vysílačem a přijímačem trvající celý časový úsek bloku.

4 Celková koncepce

Pro snadnější pochopení problému souvisejícího s řízením našeho modelu v této kapitole uvedu zevrubný popis celkové koncepce, která zahrnuje jak hardwarové, tak softwarové vybavení. U každé části je uvedena kapitola obsahující detailní popis, což by mělo přispět k rychlejší orientaci v psaném textu.

4.1 Hardwarová část

Celková koncepce z pohledu hardwaru je názorně vyobrazena na obr 3.1.



Obr. 4.1 Celková koncepce z pohledu hardwaru.

4.1.1 Heliport, trenažér a napájecí zdroj

Trenažér představuje pevné propojení vrtulníku s heliportem. Mezi hlavní důvody, proč byl vrtulník ukotven, patří nutnost zabránění pádu helikoptéry a omezení pracovního prostoru. Konstrukce trenažéru je založena na dvou kardanových kloubech spojených výsuvnou tyčí. Toto uspořádání umožňuje omezený pohyb ve 3D. Každý kloub je osazen třemi inkrementálními senzory polohy, které snímají pohyb mechanických částí, čímž dostáváme informaci o přesné poloze.

Podrobné informace o vlastní konstrukci heliportu jsou obsahem kapitoly 4. Dále jsou zde popsány použité IRC snímače polohy, snímač otáček hlavního rotoru a v neposlední řadě popsán napájecí zdroj vrtulníku.

4.1.2 Povelové řízení a sběr dat

Jak již bylo řečeno, na modelu vrtulníku se v minulosti řešily tři diplomové práce. Z těchto „historických“ důvodů povelové řízení a sběr dat zajišťují dva nezávislé přenosové kanály. Systém pro povelové řízení upravil a navrhl ve své diplomové práci Ing. Pavel Beneš. Sběr dat řešili Ing. Jaroslav Fojtík a Ing. Pavel Krsek.

4.1.2.1 Přenosový kanál pro sběr dat

Přenosový kanál pro sběr dat tvoří PCB No.1, která obstarává zpracování dat z IRC snímačů umístěných na kloubu č. 1; inkrementální hodnoty z čidel jsou zde převáděny na absolutní hodnoty. Vzhledem k umístění desky na vrtulníku obsahuje také obvody pro zpracování dat ze snímače otáček. Zpracované údaje jsou sériově přenášeny datovým vodičem do Interface.

Deska PCB No.2 obsahuje obvody pro zpracování signálů z IRC snímačů umístěných v kloubu č. 2 pod heliportem. Stejně jako deska č. 1 jsou data převáděna na absolutní hodnotu a pak následně do sériové reprezentace. V této formě se přenáší do Interface.

Sériová data z těchto dvou nezávislých zdrojů jsou v desce interface dekódována a uložena do registru simulované sběrnice mikroprocesorového systému 8080, která je spojená se vstupně/výstupním zařízením počítače.

Podrobný popis viz kapitola 6.2.

4.1.2.2 Přenosový kanál povelového řízení

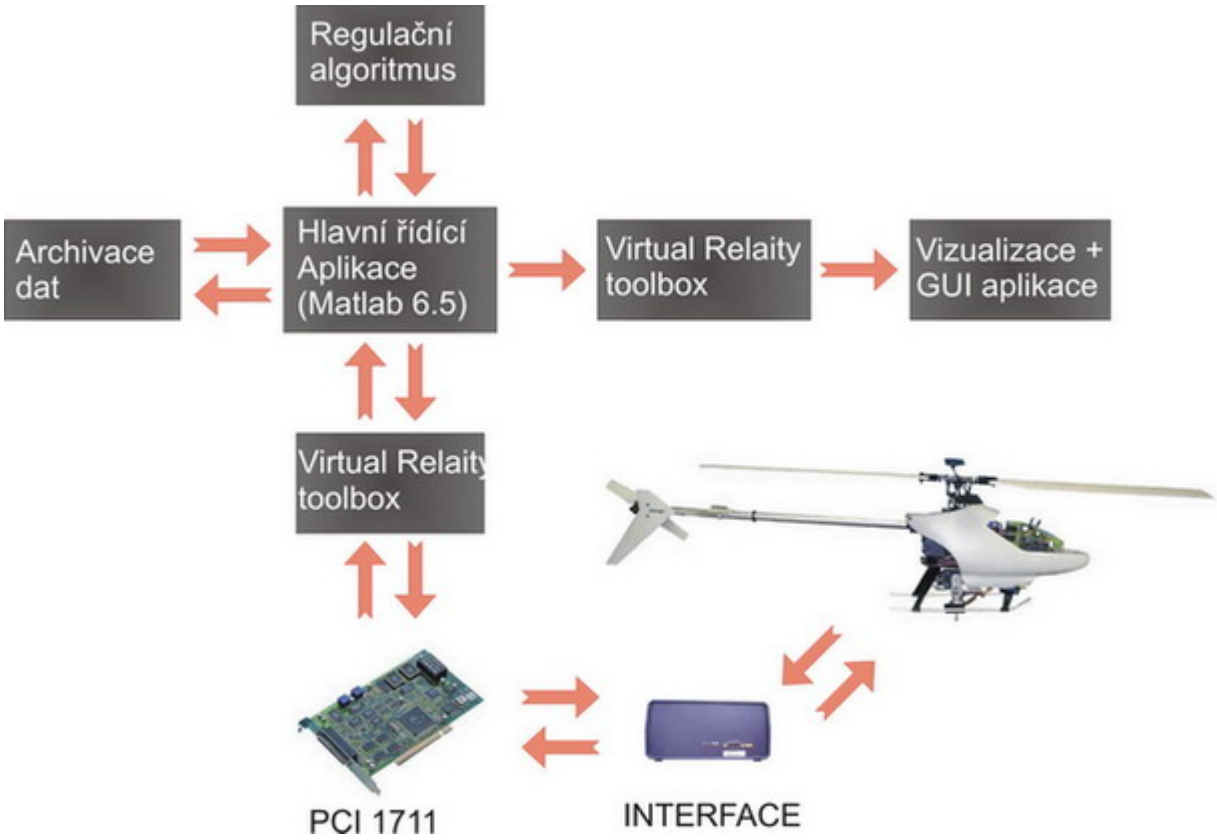
K povelovému řízení je využito původní čtyř kanálové RC soupravy. Ta byla vzhledem k požadavku regulace otáček motoru rozšířená o jeden kanál. Pro řízení se využívá pulzně šířkové modulace. Modulovaný signál je tvořen časovači 8253 řízenými z počítače. Jejich výstup je přenášen přes původní RC vysílač do RC přijímače.

Signál z prvních čtyř kanálů řídí polohová serva, pátý kanál je přiveden k dalšímu zpracování do PCB No.1, kde je z tohoto signálu tvořen PWM signál pro řízení motoru.

Podrobný popis viz kapitola 6.1.

4.2 Softwarová část

Počítač standartu PC společně s přídavnou V/V kartou PCI 1711 od firmy Advantech představuje z pohledu řízení hardwarové části modelu regulační člen. Základem programového vybavení je vývojové prostředí Matlab 6.5, na kterém běží hlavní aplikace a jeho nadstavby Real Time Toolbox a Virtual Reality Toolbox. Celková koncepce z pohledu softwaru je zachycena na obr. 3.2.



Obr. 3.2 Celková koncepce z pohledu softwaru.

.

Pomocí funkcí RT Toolboxu a příslušného driveru ovládáme vstupně/výstupní laboratorní kartu v počítači, které je spojena se simulovanou sběrnicí mikroprocesorového systému 8080, uloženou v interface. To nám umožňuje přenést data uložená v registrech do hlavní aplikace.

Přijatá data zde mohou být uložena k pozdější analýze, pomocí řídicího algoritmu zpracována a použita k zpětnému řízení modelu nebo použita pro vizualizaci.

Vizualizace je realizována pomocí Virtual Rality Toolboxu, který umožňuje práci s vektorovou grafikou 3D. Grafické uživatelské prostředí bylo vytvořeno v editoru prostředí Matlab tak, aby šly veškeré prvky aplikace ovládat pomocí myši.

Regulační algoritmus na obr. 3.2 v současné době představuje jednoduchý diskrétní PID regulátor pro zadní vyrovnávací rotor, kterým řídíme kurz modelu. Popsaný PID regulátor byl použit v demonstračním programu.

Systém je navrhnut tak, aby v budoucnu umožnil použít nástavby programu používané pro návrh sofistikovaných regulátorů. Vzhledem k tomu, že v současné době není model plně identifikován pro návrh takového regulátoru, bude potřeba identifikovat všechny parametry modelu.

Bližší informace viz kapitola 7.

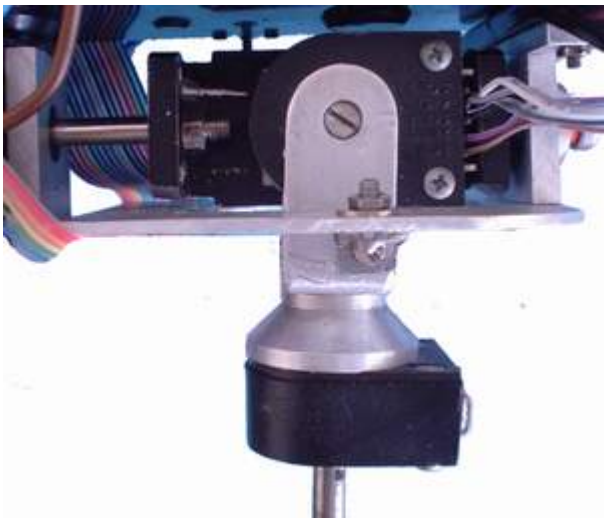
5 Konstrukce trenažéru

Důvodů, proč byl model vrtulníku ukotven pevnou konstrukcí (trenažérem) k heliportu, je více. Mezi hlavní z nich patří nutnost zabránění pádu modelu vrtulníku, který lze při ztrátě stability způsobené chybnou regulací očekávat (vrtulník je z hlediska regulace velmi nestabilní systém, proto při prvních pokusech o jeho řízení je velká pravděpodobnost ztráty stability). V důsledku pádu by došlo nevyhnutelně k destrukci vrtulníku (pokroucení konstrukce, zničení listů rotorů). Dalším neméně významným důvodem je z bezpečnostního hlediska provozu modelu vrtulníku v laboratoři nutnost omezení operačního prostoru helikoptéry.

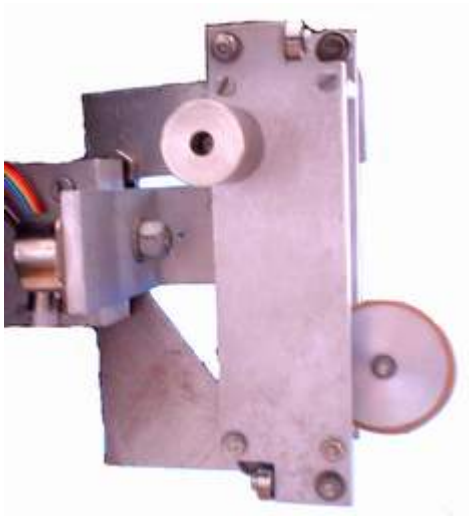
5.1 Konstrukce a poloha Heliportu v laboratoři

5.1.1 Mechanické provedení trenažéru

Trenažer byl navrhnut tak, aby co nejméně ovlivňoval pohyb vrtulníku v jeho operačním prostoru a zároveň plnil svou ochranou funkci. Dvě dvojice výkyvných kloubů spojené výsuvnou tyčí, doplněné jedním rotačním kloubem na straně vrtulníku, tvoří základ trenažéru (obr. 5.1, obr. 5.2). Toto uspořádání má 6 stupňů volnosti. Pokud by neexistovala kloubová omezení, uspořádání by umožňovalo pohyb v celém prostoru 3D.



Obr. 5.1 Kardanův kloub č.1



Obr. 5.2 Kardanův kloub č.1

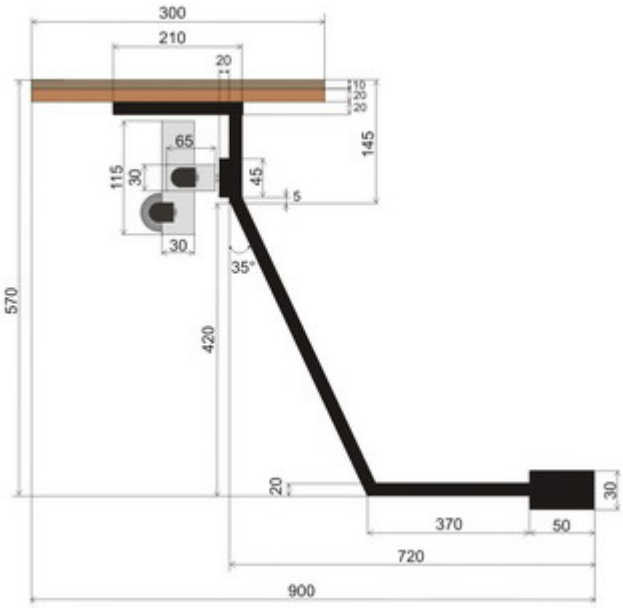
První dvojice výkyvných kloubů umožňující náklon ve dvou navzájem kolmých vertikálních rovinách je pevně uchycena pod dřevěnou kruhovou deskou o průměru 300 mm. Ta tvoří přistávací plochu pro vrtulník (heliport). Na vrchní stranu, kde helikoptéra dosedá, je přilepena měkčená pryž, která má za úkol tlumit následky způsobené tvrdým přistáním modelu (obr. 5.4). Výkyvné klouby jsou spojené výsuvnou duralovou tyčí. Aby to bylo technicky možné, ve středu heliportu byl vyvrtán kruhový otvor o průměru 130 mm, kterým tyč prochází. V důsledku tohoto uspořádání došlo k omezení pohybu kloubů, které se mohou otáčet v rozmezí od +43º do –43 ° . Vzhledem k tomuto omezení a ke konečné délce tyče (400 mm) je prostor, ve kterém se může pohybovat konec výsuvné tyče, omezen na kužel rozšiřující se směrem vzhůru (obr. 5.3). Při bližším pohledu vidíme, že se jedná o sférickou souřadnou soustavu. Na konci výsuvné tyče je pevně připevněna druhá dvojice kloubů, doplněná o rotační kloub. Ta ovlivňuje příčný a podélný náklon vrtulníku v rozmezí od +60º do –60°. Změnou souřadnice rotačního kloubu v rozmezí od 0° do 360° umožňuje libovolný kurz modelu.

Obr. 5.3 Operační prostor konce výsuvné tyče

5.1.2 Konstrukce heliportu

Nosnou konstrukci bylo potřeba navrhnout tak, aby nezasahovala do operačního prostoru modelu a zároveň byla dosažena dostatečná tuhost, která by tlumila rezonanci způsobenou otáčkami motoru. Nesmí se přitom zapomenout na vodící tyč, která při pohybu vrtulníku vyplňuje pod heliportem prostor kužele (obr. 5.3). Případná kolize s nosnou konstrukcí by mohla způsobit pád a destrukci vrtulníku.

Konstrukci tvoří ocelový čtvercový profil s hranou 20 mm. Profil je pomocí šroubů připevněn ke kruhové desce, z tohoto místa je veden pod úhlem 35° dolů. Sklon má délku 510 mm. Na konci této vzdálenosti je zlom v úhlu 125° tvarující profil tak, aby kruhová deska a profil byly rovnoběžné. Profil je na konci opatřen kruhovou patkou pro přišroubování (obr. 5.4). Díky tomuto uspořádání je konstrukci možné kamkoliv přenést, čehož jsme ve fázi seznámení s modelem využili.



Obr. 5.4 Konstrukce a rozměry heliportu

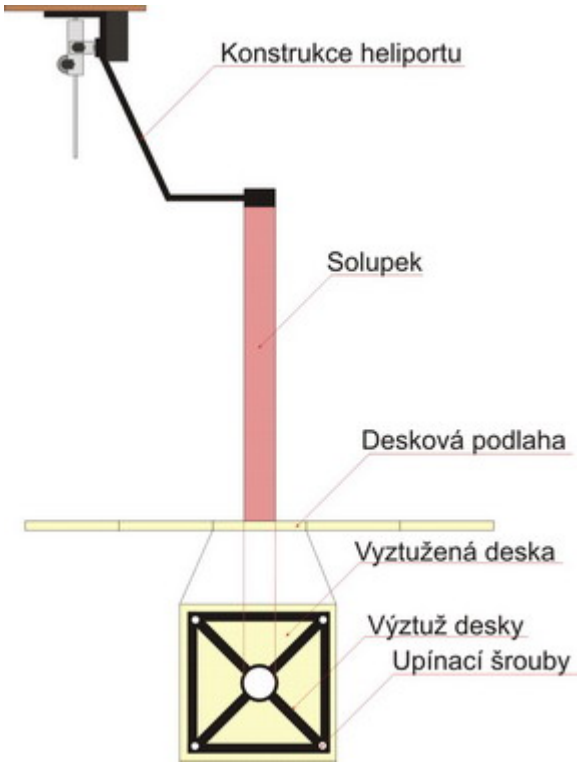
5.1.3 Ukotvení heliportu v laboratoři

Nosná konstrukce popsaná v předchozí kapitole končí 1 m stranou a 0,5 m pod úrovní kruhové desky. Tuto konstrukci je nutno umístit tak, aby při pohybu vrtulníku nedošlo ke střetu s jiným předmětem umístěným v laboratoři. Pro účely řízení je taktéž důležité, aby vrtulník nebyl umístěn blízko stěn, podlahy nebo ostatního vybavení v laboratoři, u kterého vznikají turbulence podstatně zhoršující letové vlastnosti modelu (zavádí do systému další nelinearitu).

Bylo nutno navrhnout vhodný stojan, který by splňoval tyto vlastnosti. Naši předchůdci volili mezi dvěma možnostmi:

- konstrukce uchycená ke zdi,
- nosná tyč připevněná k podlaze.

Naši předchůdci zvolili druhou variantu, kterou blíže popíšu. Podlaha v laboratoří je složena z dřevěných desek, které jsou přišroubovány ke kovovému rámu v podlaze. Ve středu jedné z nich je vyvrtán otvor, kterým prochází vertikální ocelový sloup o průměru 60 mm. Dřevěná deska je zpevněna ocelovým křížem, do něhož je sloupek ukotven. Sloupek je vysoký 1,5 m, na konci je opatřen závitem, ke kterému je šroubem M6 připevněn heliport (obr. 5.5).



Obr. 5.5 Ukotvení heliportu v laboratoři

5.1.4 Antigravitační systém

První praktické pokusy o zalétání vrtulníku ukázaly, že model není schopný kvůli své velké hmotnosti samostatného vzletu. Je to jednak dáno instalací přídavných funkčních částí na drak modelu (konstrukce nesoucí IRC čidla, IRC snímače, deska PCB No.1, silová část PWM), jednak nevhodným zvolením modelu našimi předchůdci, kteří nepočítali s navýšením hmotnosti.

Přídavné části jsou vyrobeny z lehkého hliníku, tudíž snížení jejich hmotnosti by bylo velmi obtížné. Hmotnost IRC snímačů instalovaných na modelu je při porovnání s konstrukcí, která čidla nese, zanedbatelná. Proto jejich případná výměna za novější se jevila jako zbytečná. Na základě daných možností jsem se snažil problém nejprve vyřešit instalací silnějšího motoru s větším počtem otáček. Toto řešení však nevedlo k cíli, neboť při vyšších otáčkách, než na které je model konstruován, dochází k nadměrnému namáhání mechaniky převodového ústrojí.

V průběhu testování se zjistilo, že původně dodávané listy rotoru vyrobené z umělé hmoty, nedokáží udržet vztlak a podléhají torzi, což značně ubírá helikoptéře na výkonu. Vzhledem k roku výroby modelu se již nevyrábějí dřevěné ani duralové listy rotoru, které by tento problém mohli vyřešit. Jako nejschůdnější řešení se ukázala instalace podpůrného antigravitačního systému skládajícího se z "letecké" gumy, která nadlehčuje vrtulník přes vodící tyč. Toto řešení není ideální, neboť do systému zavádí další nelinearitu způsobenou napínáním gumy, nicméně je postačující do doby, než budou k dispozici tvrdší listy rotoru.

5.1.5 Praktické zkušenosti s heliportem

Celá konstrukce heliportu se při provozu modelu helikoptéry jeví jako dostatečně robustní. Jedinou vadou, kterou jsme našli, je kolize vyrovnávacího rotoru s první částí upevňovací konstrukce, která nastává při poloze vrtulníku v záklonu s přídí kolmo vzhůru v rovině upevňovací konstrukce.

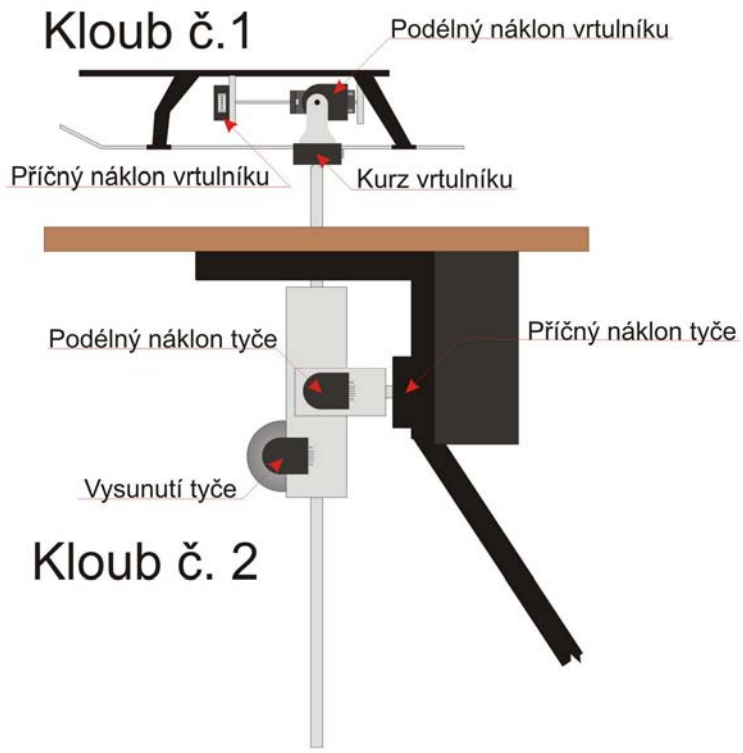
Vzhledem k tomu, že odstranění této kolize není jednoduché (vyžadovalo by změnu první částí upevňovací konstrukce, případně mechaniky trenažéru) a pravděpodobnost popsané kolize, ke které může dojít pouze při pádu vrtulníku, je malá, neprováděli jsme žádné změny ve stávající konstrukci. Během testování regulačních algoritmů, při kterých očekáváme nestabilitu, je na tuto kolizi nutno brát zřetel.

Pokud by vyvstal požadavek na odstranění bezprostřední kolize listů vyrovnávacího rotoru s konstrukcí; doporučuji opatřit vyrovnávací rotor ochranným krytem. Při kolizi by došlo pouze k odražení modelu od konstrukce.

5.2 Snímání polohy

Znalost přesné polohy je podmínkou pro úspěšné řízení modelu helikoptéry. Proto byl trenažér opatřen rotačními inkrementálními snímači polohy. Vzhledem k tomu, že se nepředpokládá autonomní pohyb modelu, je nejefektivnější řešení určovat polohu z postavení mechanických částí.

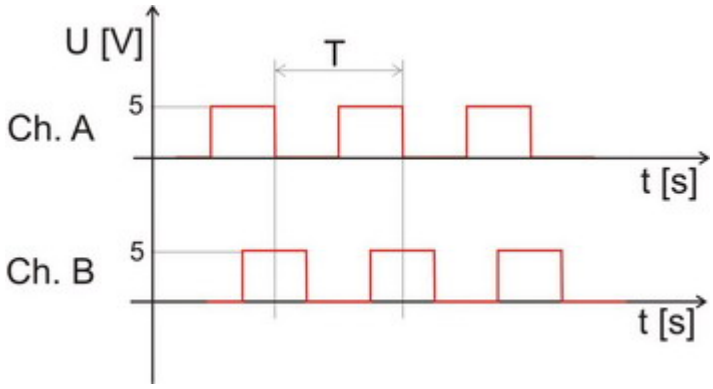
Snímače polohy osazené na trenažéru jsou dvojího typu, a to IRC 450.1 typ B, respektive Bz. Použité snímače se liší počtem period výstupního signálu na otáčku a použitím indexu, který se u typu Bz generuje jednou za celou otáčku inkrementálního snímače. U modelu není tato vlastnost využita. Rozlišení snímače typu Bz je 540 dílků/ot, typ B má rozlišení 512 dílků/ot. Vysunutí tyče a kurz vrtulníku jsou snímány snímači typu B, ostatní klouby jsou osazeny snímači v provedení Bz. Aby bylo možné snímat vysunutí tyče inkrementálním snímačem polohy, je vysunutí tyče převedeno pogumovanou kladkou na otáčení, čímž se zvýšilo i rozlišení pohybu. Rozmístění snímačů ukazuje obr. 5.6.



Obr. 5.6 Rozmístění IRC snímačů polohy

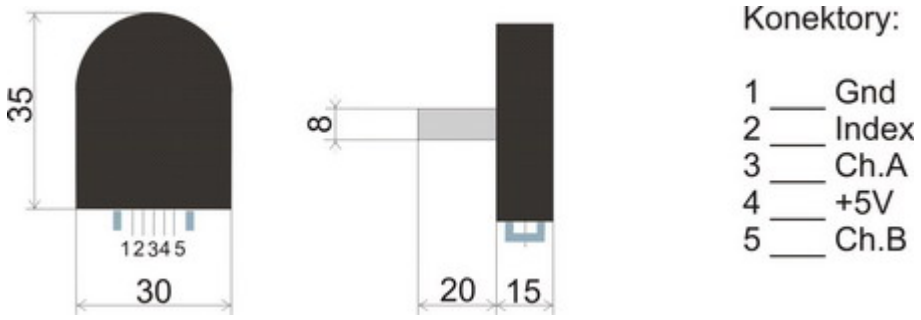
5.2.1 Charakteristiky inkrementálních snímačů

Oba typy inkrementálních snímačů vyžadují napájecí napětí 5V. Jejich proudový odběr je v řádech desítek mA. Fázově posunutý výstup v TTL logice má označení Ch.A, Ch.B. Výstupy jsou vůči sobě fázově posunuty o ±¼ periody vztaženo k signálu v Ch.A; znaménko udává směr pohybu (typický průběh je zobrazen na obr. 5.7).



Obr. 5.7 Výstupní signál z IRC snímačů pro pravotočivou rotaci

Zapojení snímačů a jejich rozměry jsou přehledně vyobrazeny na obr. 5.8.

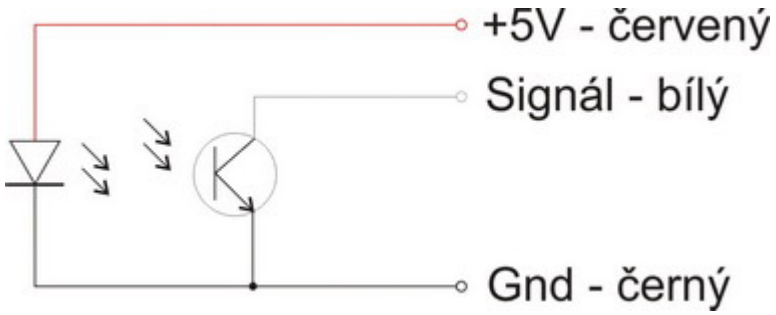


Obr. 5.8 Rozměry a zapojení IRC snímačů

5.3 Snímač otáček nosného rotoru

Snímač otáček nosného rotoru je umístěn uvnitř draku modelu. Z důvodu souhrnného popisu všech snímačů ho uvádím v této kapitole.

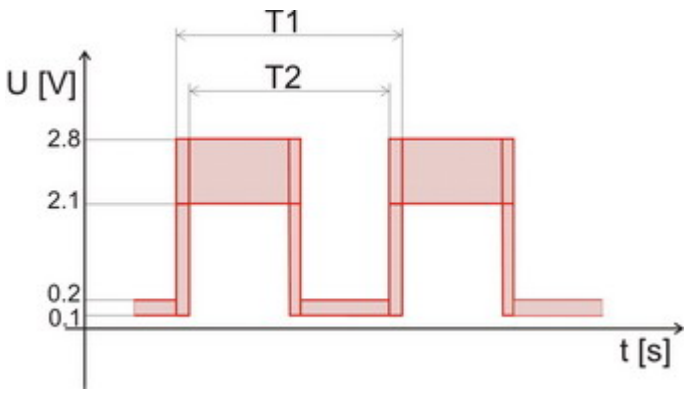
Snímač je realizován světelnou závorou, jejíž clonka byla z prostorových důvodu umístěna na hřídeli pohánějící vyrovnávací rotor (obr. 5.9). Pokud je motor v záběru, jsou otáčky vyrovnávacího rotoru úměrné otáčkám nosného rotoru. V době volnoběhu tato úměrnost neplatí. Z tohoto důvodu čidlo dává chybnou informaci. S touto nepřesností při měření musíme počítat při návrhu řízení.



Obr. 5.9 Schéma snímače otáček (s barevně označeným vedením)

Snímač otáček osadil v rámci své diplomové práci Pavel Beneš. Výstupní průběh signálu je na obr. 5.10. Jednotlivé pulzy se navzájem liší jak amplitudou, tak šířkou (šrafovaná oblast). Pro přímé zpracování v obvodu Xilinx je tento signál značně nevhodný. Z tohoto důvodu se výstupní signál upravuje pomocí TTL tranzistorového zesilovače, který bude popsán v kapitole 6.

Poznámka: Při měření výstupního signálu snímače otáček je potřeba mezi zdroj napětí a dva konektory (červený a bílý) vložit sériový odpor (v mém případě 470 Ω a 20 kΩ), jinak dojde k poškození diody a tranzistoru.



Obr. 5.10 Průběh výstupního signálu

Tranzistorovým zesilovačem odstraníme pouze rozdílnou amplitudu výstupního signálu. Rozdílná šířka pulzů nám zavádí nejednoznačnost v počtu pulzů na jednu otáčku hlavního rotoru. Díky této chybě připadá na jednu otáčku hlavního rotoru devět až deset pulzů. Tento efekt je vyhlazen klouzavým průměrem implementovaným v obvodu Xilinx na PCB No.1 (bližší informace v kapitole 6).

5.4 Napájecí zdroj

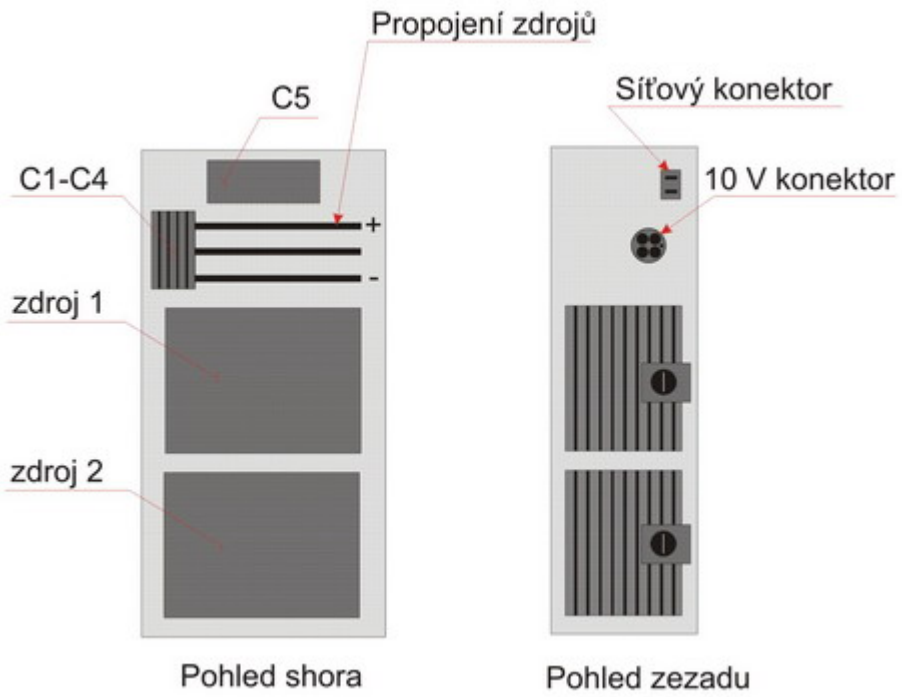
Model vrtulníku je konstruován na napájecí napětí v rozsahu 9 – 12 V. Při maximálním výkonu a napětí 10 V odebírá ze zdroje 24 A. Protože se ve vybavení laboratoře nenacházel a v současné době nenachází průmyslově vyráběný zdroj, který má požadované vlastnosti, museli si naši předchůdci zdroj vyrobit vlastními silami (součástí semestrální práce).

5.4.1 Konstrukce zdroje

Zdroj je postaven na dvou sériově zapojených impulzních měničích 5V/50A typu DC C 205 vyrobených v ZPA Děčín, které jsou uloženy do standardizované skříně (obr. 5.12).

Zdroje jsou připojeny ke konektorům umístěných na zadním panelu (obr. 5.11). Z důvodu zabránění možné záměny je každý konektor jiného typu. Síťový konektor je typu “střední žehlička“. Pro vývod 10V napětí je použit čtyřdutinkový kruhový konektor (obr. 5.11).

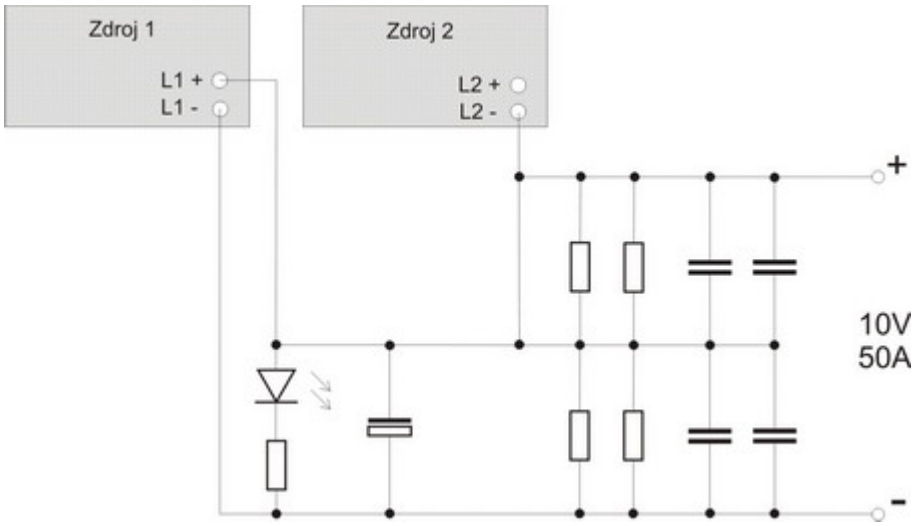
Obr. 5.11 Výstupní 10V konektor



Obr. 5.12 Rozmístění součástek zdroje

Schéma vnitřního zapojení zdroje je na obr. 5.13. C1-C4 jsou filtrační kondenzátory napětí. Proudová špička, která vzniká při změně výkonu motoru z nulové hodnoty na sto procent, dosahuje hodnot blízkých nominální hodnoty zdroje 50A. Proto doporučuji plynulou regulaci otáček. Proudová špička je tlumena odporem přívodních vodičů, který není při daných proudech zanedbatelný. Zde bych chtěl upozornit, že při změně napájecích vodičů je třeba brát zřetel na jejich odpor a s tím související úbytky napětí na vedení.

Použitý typ impulzních měničů nemůže pracovat naprázdno (vznikají velmi vysoká napětí ve spínacích částech zdroje), proto je ke každému zdroji připojen zátěžový 5Ω odpor složený z paralelní kombinace dvou odporů 10Ω/6W. Při provozu protéká každým odporem proud 0.5 A. Celková výkonová ztráta tak představuje 5 W pro jeden zdroj (dvouprocentní zatížení naprázdno z nominálního proudu).



Obr. 5.13 schéma zdroje

5.4.2 Přívod napájení k vrtulníku

Všechny pokusy našich předchůdců o použití uhlíkových kartáčů, které by umožňovaly volný pohyb v kloubu č.1, selhaly z důvodů rychlé oxidace a s tím související zvýšení přechodového odporu (to má za následek již zmíněnou velkou napěťovou ztrátu). Vzhledem k této skutečnosti jsme tuto cestu zavrhli a přívod energie byl vyřešen tzv. dvojlinkou, kterou vedeme z důvodu co nejmenší změny dynamiky modelu kolmo vzhůru vnitřkem spojovací tyče ke kloubu č.1. Zde dvoujlinka tvoří volný závit, umožňující pohyblivost modelu (závit je nastaven tak, že umožňuje modelu tři otáčky kolem středové osy).

Jako ochranu proti ukroucení dvoulinky jsme uvažovali o instalaci spojky, která by omezovala pohyb vrtulníku o tři otáčky do každého směru. Toto řešení by si však vyžádalo další navýšení hmotnosti už tak těžkého modelu, proto jsme jej zamítli a daná ochrana byla naimplementována do řídicího algoritmu (více v kapitole 7).

Vyřešení problému pomocí metalického přívodu energie přináší proti konstrukci trenažéru zanedbatelnou změnu dynamiky modelu, navíc se neuvažuje o volném pohybu modelu. Z těchto důvodů se dané řešení jeví jako dostačující.

5.4.3 Praktické zkušenosti a provozní zkouška

Po celou dobu provozu pracoval napájecí zdroj spolehlivě až na jednu výjimku, kdy nám vypadl první spínaný zdroj. Oprava spočívala v dotažení upínacích šroubů na propojovacích destičkách. Od té doby pracuje zdroj spolehlivě.

6 Hardwarová část projektu

Kapitola se zabývá původním a nově zkonstruovaným hardwarem. U hardwaru, který zůstal nezměněn, je pro snadnou orientaci v problému popsána jeho činnost, přičemž důraz je kladen na vnitřní strukturu, kterou potřebujeme znát z hlediska ovládání vrtulníku z PC. U nového hardwaru je uveden důvod výměny stávajícího řešení a podrobně popsána nová konstrukce.

6.1 Systém povelového řízení

Systém povelového řízení zahrnuje obvody: V/V kartu PCI – 1711, Interface, RC souprava, PCB No.1 a výkonovou část PWM. Jednotlivé části a vazby mezi nimi budou podrobně popsány v následujícím textu.

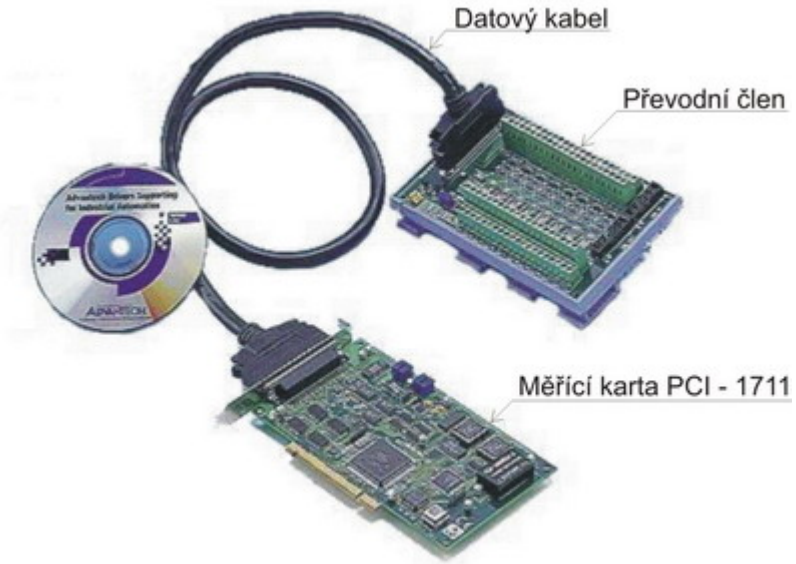
6.1.1 Komunikace PC – Interface

O vzájemnou komunikaci se na straně počítače stará V/V PCI karta PCI – 1711 od firmy Advantech, která je s ostatním hardwarem propojena přes simulovanou sběrnici mikroprocesorového systému 8080 uloženou v Interface.

6.1.1.1 Vstupně výstupní karta Advantech PCI - 1711

Původní laboratorní karta PCL-812 byla určena pro sběrnici ISA. Sběrnice se již u moderních základních desek nepoužívá a byla vytlačena rychlejší sběrnicí PCI. Pro řízení, jak bude vysvětleno v dalším textu, je nutné aby nová karta měla minimálně 15 digitálních výstupů a 8 digitálních vstupů, byla kompatibilní se základní deskou našeho počítače (Pentium P4/3GHz) a umožňovala komunikaci s Real Time Toolboxem (RT Toolbox).

Z široké nabídky laboratorních karet splňující naše požadavky jsme si vybrali z důvodů snadné dostupnosti (laboratorní karta již byla součástí vybavení laboratoře) vstupně/výstupní (V/V) laboratorní kartu PCI - 1711 od firmy Advantech (obr. 6.1). Základní parametry karty obsahuje tabulka 6.1.

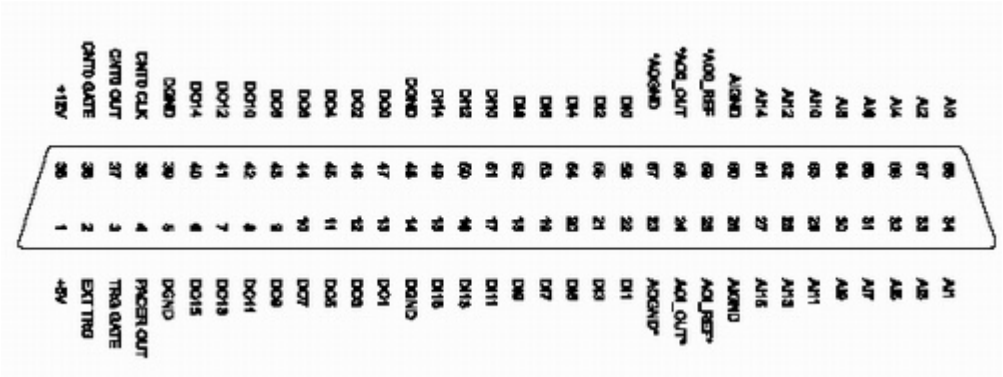


Obr. 6.1 Laboratorní karta PCI - 1711 s příslušenstvím

Parametry	Vlastnosti
16 analogových vstupů	Rozsah: ± 10 V, doba převodu 10 μ
16 analogových výstupů	Rozsah: 0 až +10 V
16 digitálních výstupů	Úrovně napětí: U ≤ 0,8 V … log 0 U ≥ 2 V … log 1
16 digitálních vstupů	Úrovně napětí: U ≤ 0,8 V … log 0 U ≥ 2V … log 1
12bit A/D převodník	Maximální vzorkovací frekvence: 100 kHz
Integrovaný program. čítač	Base clock: 10 MHz
Integrovaný FIFO buffer	Velikost: 1K

Tab. 6.1 Parametry laboratorní karty Advantech PCI - 1711

Z tab. 6.1 vidíme, že laboratorní karta daného typu obsahuje celkem 16 logických vstupů a 16 logických výstupů. Tyto logické signály jsou z hlediska počítače 16bitové registry mapované v jeho V/V adresním prostoru. Při zápisu se data objeví na výstupu karty ihned, jakmile je počítač zapíše do příslušného registru, a setrvají tam do opětovného přepsání. Na vstupu počítač přečte data, která se právě nachází na vstupním konektoru. Převodní člen (obr. 6.2) dodávaný ke kartě umožňuje připojení dvou dvacetižilových samořezných kabelů použitých pro vstup i výstup z Interface**.** Připojení převodního členu k PCI kartě je realizováno datovým kabelem, dodávaným výrobcem karty. Přiřazení pinů karty jednotlivým signálům je na obrázku 6.2.



Obr. 6.2 Přiřazení pinů signálům na kartě PCI - 1711

Poznámka: Při odpojení datového kabelu (obr. 6.1) po inicializaci karty dochází ke kolizi, která vyústí v zamrznutí PC. Počítač poté nereaguje na žádné vstupní podněty a musí být restartován. Příčina souvisí s neošetřenou správou prostředků karty v OS Windows a použitými ovladači. Z tohoto důvodu se nesmí datový kabel odpojovat. Odpojení interface od V/V karty je možné bez rizika kolize provést pomocí samořezných kabelů.

Pro komunikaci s hardwarovou částí je využito 8 logických vstupů a 15 logických výstupů. 8 logických vstupů a 8 logických výstupů je využito pro externí datovou sběrnici, zbývající logické výstupy generují řídicí signály sběrnice. Přehled jednotlivých bitů a jejich význam je uveden v tab. 6.2.

Signál karty PCI 1710	Signál sběrnice standartu 8080	Význam signálu	Číslo vývodu konektoru	Konektor v Interface
Použité výstupy karty				
D/O 0 – D/O 7	D0 – D7	Datová sběrnice pro zápis	1 – 8	K1
D/O 8 – D/O 12	A0 – A4	Adresy sběrnice	9 – 13	K1
D/O 13	Není použito	----------	14	K1
D/O 14	RD	Řídicí signál čtení	16	K1
D/O 15	WD	Řídicí signál zápisu	16	K1
GND1	GND1	Společná zem 1	17 a 18	K1
Vcc 1 + 5 V	+5 V	5V napájení 1	19	K1
Vcc 1 + 12 V	+12 V	12V napájení 1	20	K1
Použité vstupy karty				
D/I 0 – D/I 7	DO – D7	Datová sběrnice pro čtení	1 – 8	K2
D/I 8 – D/I 15	Není použito	----------	9 – 16	K2
GND2	GND2	Společná zem 2	17 a 18	K2
Vcc 2 +5V	+5V	5V napájení 2	19	K2
Vcc 2+12V	+12V	12V napájení 2	20	K2
Poznámky				
GND1 a Gnd2	Země jsou na straně karty vodivě propojeny.			
Vcc 1 a Vcc 2	Jak 5V tak 12V napájení jsou na straně karty vodivě propojeny.			

Tab. 6.2 Připojení PC - Interface

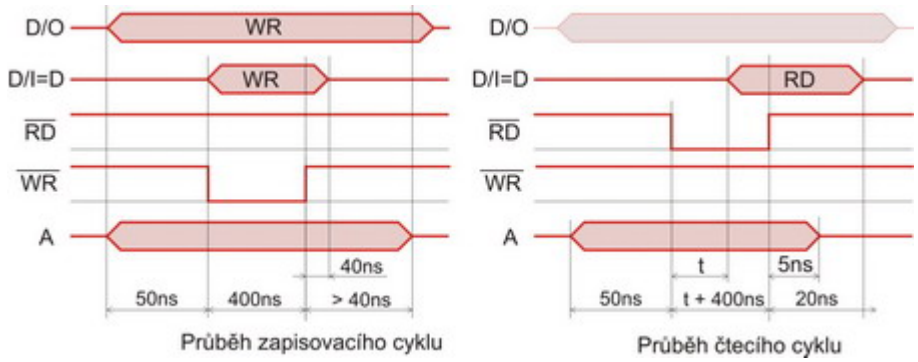
Karta je řízena přes ovladač zavedený v RT Toolboxu a souborem příkazů, které přes ovladač karty umožňují nastavovat výstupní hodnoty a přistupovat ke vstupům. Bližší informace o softwarovém řízení karty je uvedeno v kapitole 7.

Poznámka: K připojení Interface je možno použít libovolnou digitální V/V kartu, která má příslušný počet logických vstupů a výstupů. Logické výstupy však musí být opatřeny pamětí, aby data byla stále k dispozici až do své změny.

6.1.1.2 Vnitřní sběrnice v Interface

Přes simulovanou sběrnici mikroprocesorového systému 8080 jsou k počítači připojeny registry systému pro sběr dat (bude popsán v oddílu 6.2) a registry vysílacích časovačů jejich funkce bude popsána níže.

Jedná se o obousměrnou 8 bitovou sběrnici s původně 16 bitovou adresou, která byla vzhledem k použití snížena na 5 bitů. Směr přenosu dat udávají signály RD a WD aktivními v logické nule. Časový průběh čtecího a zapisovacího cyklu viz. obr. 6.3. Význam označení je shodný s tab. 6.2.



Obr. 6.3 Čtecí a zapisovací cyklus

Čtení, respektive zápis, se provádí s nástupní hranou signálu RD, respektive WD, proto je nutné, aby při zápisu byla data na sběrnici D s předstihem před touto hranou a setrvala na ní i po hraně. Adresu je vždy nutno dát s předstihem před aktivním signálem RD a WD a zajistit i její setrvání po celý cyklus s dostatečným přesahem. V případě čtení jsou data dodána koncovým zařízením v čase t. V tomto případě se koncovým zařízením myslí obvod Xilinx; význam bude vysvětlen v části popisující systém pro sběr dat.

Dané velikosti časových údajů představují minimální doporučené hodnoty, které nemohly být z důvodu nižší maximální přístupové frekvence počítače dodrženy (bližší informace viz. kapitola 7). V programu použité doby časování jsou výsledkem dlouhodobých experimentů. Při případném pokusu o ladění čtecího a zapisovacího cyklu je nezbytné dodržet posloupnost signálů. Tuto činnost však z časových důvodů nedoporučuji. Funkčnost našeho řešení je praxí prověřená.

6.1.1.3 Logické propojení sběrnic

Z důvodu, že logické vstupy a výstupy V/V karty jsou jednosměrné a sběrnice systému je obousměrná, bylo potřeba využít obvodů pro řízení sběrnice. Řízení je odvozeno od signálů WR a RD, přičemž je zajištěno, aby oba signály nemohly být aktivovány současně.

Vstup je řešen přímým připojením vstupů karty D/I0 - D/I8 k příslušným bitům datové sběrnice D. To je důvod, proč se data na D/I objevují v obr. 6.3 jak ve čtecím tak v zapisovacím cyklu. Přičemž správnost čtení je zajištěna programovým vybavením. Podobně je připojena i adresová sběrnice A k výstupním signálům D/O8 - D/O12. Přímé spojení je v případě adresy umožněno tím, že počítač je jejím jediným zdrojem. Naopak výstupní datové signály D/O0 - D/O7 musí být odděleny od datové sběrnice z důvodů stálého "visení" výstupních dat. Oddělovač reprezentuje jednosměrný třístavový budič 74HCT373, který je řízen signálem WR. To je důvod, proč na se na obr. 6.3 v zapisujícím cyklu objeví data na sběrnici D (spojená s D/I) až po aktivaci WR, přičemž u čtecího cyklu jsou "visící" data na D/O od sběrnice D oddělena.

6.1.1.4 Propojovací kabely

Fyzicky je propojení mezi Interface a převodním členem V/V karty provedeno dvěma plochými kabely opatřenými na obou stranách samopřeznými konektory s dvaceti vývody. Jeden kabel je vstupní (spojuje signály D/I), druhý je výstupní (signály D/O). Oba kabely do krabičky Interface navíc přivádí 5V a 12V napětí (není využito). Pěti voltové napětí se využívá nejen k napájení Interface, ale i všech připojených periferií (vysílačka TX, PCB No.2).

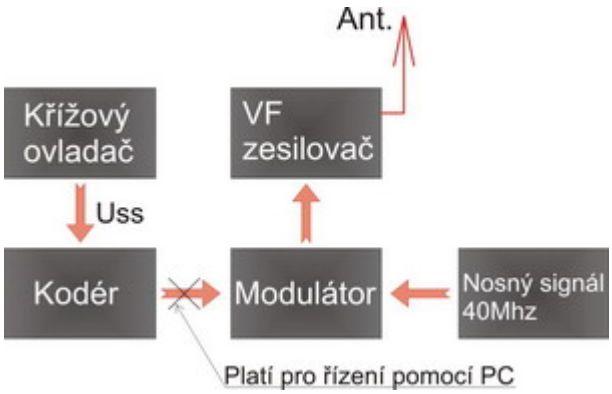
Poznámka: Všechny uvedené části jsou napájeny přes 1A pojistku.

Oba kabely jsou sice na obou stranách záměnné, ale jak na krabičce Interface tak na převodním členu jsou konektory označeny D/I a D/O, proto při troše opatrnosti nemusí k záměně dojít. Pokud by ní i přesto došlo, deska Interface nebude ohrožena (napájení jsou na obou stranách ve stejných pinech), pouze nebude fungovat řízení a sběr dat z vrtulníku (záměnu kabelů zachytí softwarový test – více v kapitole 7). Po uvedení kabelů do správné konfigurace bude zařízení opět korektně fungovat.

6.1.2 RC souprava a vysílací časovače

6.1.2.1 Funkce sériově vyráběné RC soupravy

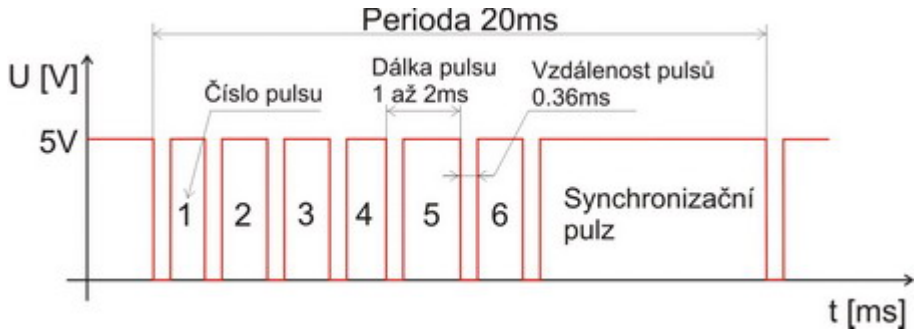
Původně čtyř kanálová RC souprava využívá pulzně šířkové modulace s časovým dělením kanálu. Šířky jednotlivých pulzů jsou odvozeny v kodéru od stejnosměrného napětí generovaného výchylkou potenciometru, který je mechanicky spojen s pákovými ovladači. Takto vzniklý signál moduluje v amplitudovém analogovém modulátoru nosný signál o frekvenci 40,695 MHz. Výstup z modulátoru je ve VF zesilovači zesílen a poté se šíří vzduchem do přijímače. Blokové schéma viz obr. 6.4.



Obr. 6.4 Blokové schéma RC vysílače

6.1.2.2 Úpravy pro řízení počítačem

Kvůli požadavku na řízení otáček motoru byla souprava rozšířena o dva kanály. Pátý kanál se využívá pro řízení motoru, šestý kanál je nevyužit. Průběh vysílacího rámce viz obr. 6.5. Význam jednotlivých pulzů na řízení je v tab. 6.3.



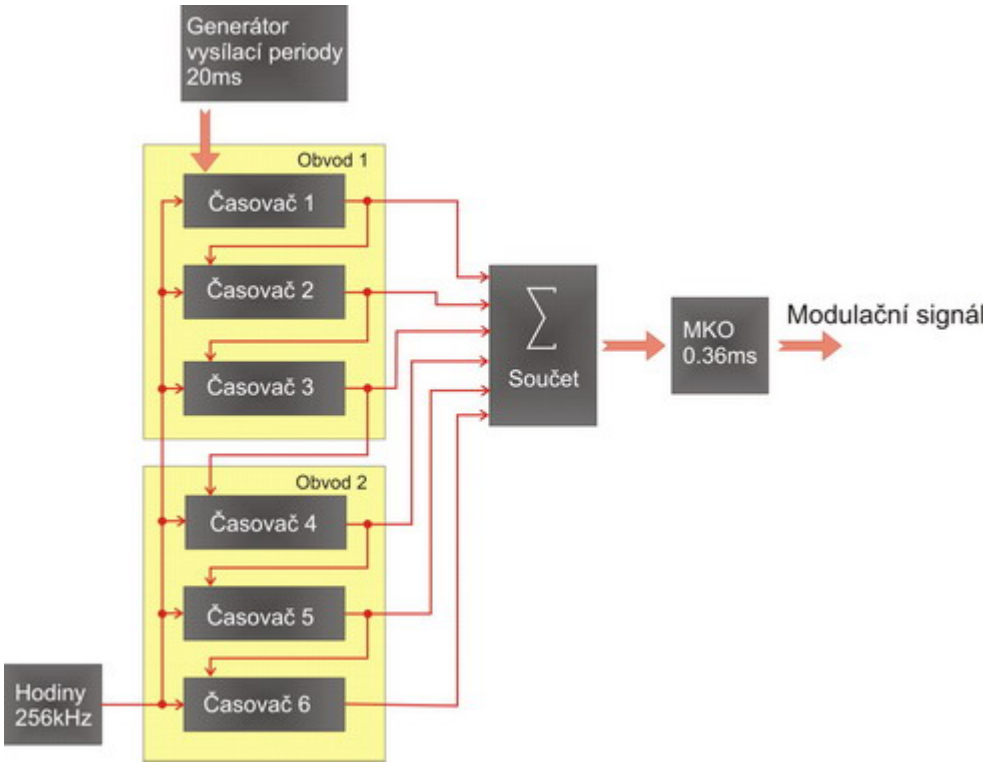
Obr. 6.5 Vysílací rámec RC vysílače

Číslo Pulzu	Význam pulzu na řízení
1	Podélná cyklika
2	Příčná cyklika
3	Kolektivní řízení
4	Nastavení listů ocasního rotoru
5	Výkon motoru
6	Nepoužito

Tab. 6.3 Význam jednotlivých pulzů

Informaci o požadované poloze serva, respektive o výkonu motoru, nese vzdálenost mezi jednotlivými pulzy, která může být mezi 1 až 2 ms. Délka vysílaného rámce je závazná. Nutné je také dodržet minimální délku synchronizačního pulzu, který doplňuje periodu do stanovené délky. V případě, že použijeme širší informační pulzy a zkrátíme tak pulz synchronizační, dojde k rozpadu přenosu (tuto situaci poznáme podle náhodných trhavých pohybů serv). K rozpadu přenosu dojde i v případě, že šířka pulzu bude menší jak požadovaná 1 ms. Z tohoto důvodu nesmíme zapomínat na šířku pulzu nevyužitého šestého kanálu.

Při řešení problému řízení vrtulníku pomocí počítače se ukázalo jako jednodušší vytvářet šířkově modulovaný signál (stejný jako na obr. 6.5), a ten pak přivést do modulátoru, při součastném odpojení původního kodéru (v obr. 6.4 naznačeno přeškrtnutím šipky), než generovat stejnosměrné napětí, a to pak zavádět do kodéru. Modulační signál vstupující do modulátoru je vytvářen kaskádou šesti monostabilních klopných obvodů (MKO) fyzicky uložených v Interface, které jsou nastavitelné počítačem. Blokové schéma je na obr. 6.6.



Obr. 6.6 Blokové schéma vysílacích časovačů

Generátor vysílací periody je tvořen astabilním klopným obvodem, který je nastaven na pevnou vysílací periodu o velikosti 20 ms. Astabilní klopný obvod na začátku periody spouští první MKO. Ten po překlopení do stabilního stavu spouští následující MKO atd. Každý MKO představuje požadovanou polohu pro jedno servo, respektive velikost otáček. Signály ze všech MKO se na výstupu sečtou tak, aby vytvořili modulační signál. Takto vzniklý signál však v porovnání se signálem z obr. 6.5 neobsahuje předepsanou prodlevu mezi pulzy, která činí 0,36 ms, proto je mezi jednotlivými pulzy tato prodleva vkládána dalším MKO na výstupu. Číslování čítačů na obr. 6.6 se shoduje s číslováním pulzů v tab. 6.3. Připomínám, že délka pulzu každého MKO musí být mezi 1 až 2 ms.

6.1.2.3 Parametry vysílacích čítačů

Monostabilní klopné obvody jsou obvodově realizovány pomocí dvou univerzálních programovatelných čítačů s označením 8253. Každý obvod 8253 umožňuje vytvořit tři čítače/časovače po 16b, které mohou pracovat jako MKO. Hodinový kmitočet časovačů je velikosti 256kHz. Z tohoto důvodu a potřeby délky pulzu od 1 do 2 ms musíme předvolby registrů nastavovat v rozmezí od 256 do 512.

Každý čítač obsahuje čtyři registry, které jsou připojeny k vnější datové sběrnici komunikující s PC. Tři z těchto registrů jsou registry předvolby čítačů, čtvrtý registr je registr řídicí. Přehled o jednotlivých adresách ze strany počítače v tab. 6.4.

Registr	Adresa
Obvod č. 1	
Předvolba čítač 1	00000B
Předvolba čítač 2	00001B
Předvolba čítač 3	00010B
Řídicí registr	00011B
Obvod č. 2	
Předvolba čítač 4	00100B
Předvolba čítač 5	00101B
Předvolba čítač 6	00110B
Řídicí registr	00111B

Tab. 6.4 Adresování vysílacích čítačů

Při zapnutí a ztrátě energie vyžadují programovatelné obvody řady 8253 inicializaci. Bez inicializace se zařízení nechová korektně a nelze vyloučit i rozběh motoru (z důvodu náhodného nastavení výstupů jednotlivých čítačů). Inicializace se provádí nahráním 8 bitových konfiguračních dat na adresu řídicího registru, přičemž je potřeba nastavit všechny čítače. Význam a popis jednotlivých bitů v řídicím slovu viz příloha A.

Jak je z tabulek a z textu v příloze patrné, aby čítače pracovaly jako 16 bitové MKO, kdy výstup předešlého MKO spouští hardwarovou cestou odpočet následujícího MKO (nastavení čítačů do 1 módu), musíme bity v řídicím slovu pro jednotlivé čítače nastavit tak, jak ukazuje tab. 6.5.

	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Význam bitu	SC1	SC0	WR1	WR2	M2	M1	M0	BCD
Čítač 1	0	0	1	1	0	0	1	0
Čítač 2	1	0	1	1	0	0	1	0
Čítač 3	0	1	1	1	0	0	1	0

Tab. 6.5 Použité konfigurační data

Zápis 16 bitových dat do registrů určených pro předvolby čítačů se provádí postupně po 8 bitech. Přepis registru je proveden během dvou sběrnicových cyklů. Při prvním je čtena nižší a při druhém vyšší slabika.

6.1.2.4 Propojení Interface – vysílačka

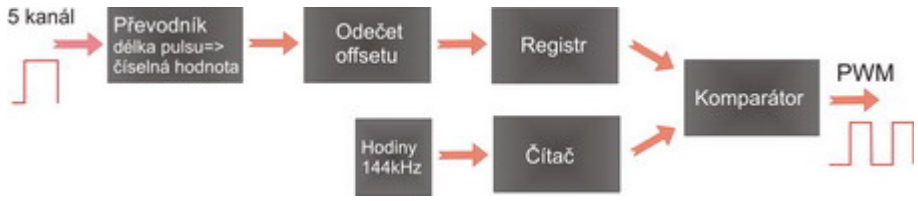
K fyzickému propojení vysílače a obvodu Interface je použit patnáctižilový kabel zakončený na obou koncích konektorem Canon. Kabelem vede modulační signál z vysílacích časovačů a 5V napájení (přivedeno ze V/V karty). Přívodní kabel byl předimenzován z důvodu, že se uvažovalo o přenosu analogových údajů z křížových ovladačů vysílače do PC. Tato možnost však zůstala nevyužita.

6.1.3 Zpracování řídicího rámce

Po přijetí řídicího rámce a jeho demodulaci v přijímači RC jsou získány stejné průběhy jako na obr. 6.5. První čtyři obdélníkové pulzy jsou bez dalšího zpracování využity k řízení jednotlivých serv. Z pátého pulzu je vyvozen signál řídicí přes silovou část PWM motor.

6.1.3.1 Odvození PWM z pátého kanálu

PWM signál řídicí motor je odvozen v programovatelném logickém poli Xilinx, umístěném v PCB No.1. Šířka pulzu pátého kanálu je zde změřena a převedena na číslo. Číselný údaj představující požadovanou délku pulzů je uložen po odečtení offsetu (již zmíněná 1ms) do registru. Výstupní signál PWM je vytvořen komparátorem, který porovnává požadovanou hodnotou uloženou v registru s výstupem stále běžícího čítače. Blokové schéma viz obr. 6.7. Podrobný popis vnitřního zapojení naleznete v [5].



Obr. 6.7 Blokové schéma činnosti generátoru PWM

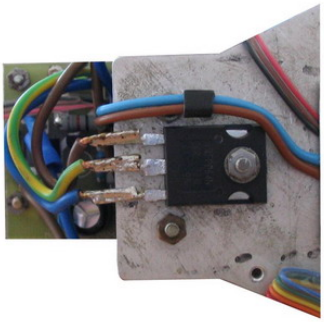
Původní deska č.1 byla ve velmi špatném technickém stavu, který znemožňoval její funkci. Z tohoto důvodu jsem desku č.1 vytvořil podle stávající předlohy s úpravami znovu. Podrobné informace o stavu původní desky a konstrukci nového řešení naleznete v samostatné oddílu 6.3.

6.1.3.2 Silová část PWM

Výstupní PWM signál z desky č.1 je pro přímé řízení motoru po výkonové a úrovňové stránce nevhodný. Proto bylo zapotřebí mezi signál a motor vložit obvod buzení motoru, který by odstranil zmíněné nedostatky. Tak, jako špatný stav desky č.1, si špatný stav desky silové části vyžádal nové řešení.

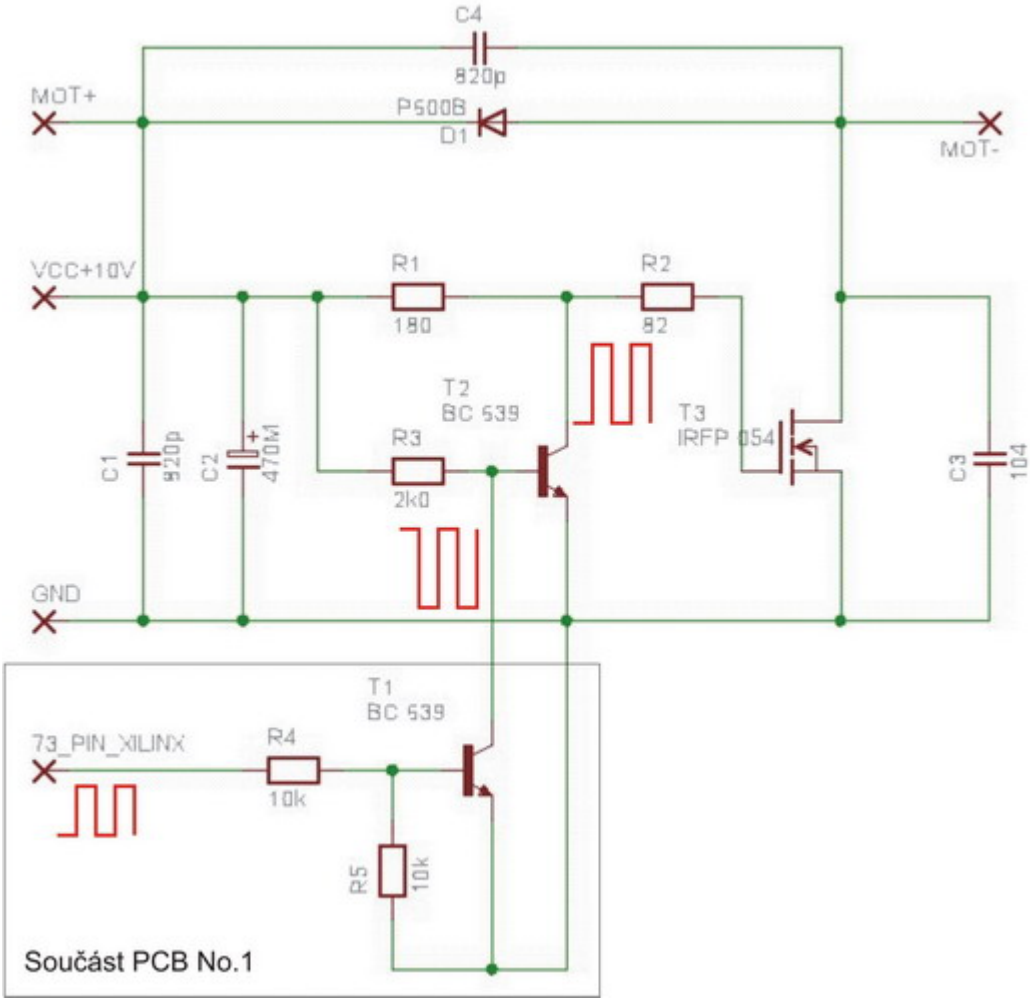
Špatný technický stav obou desek umístěných přímo na modelu si vysvětluji tím, že při činnosti vrtulníku jsou zmíněné plošné spoje vystaveny otřesům urychlující jejich stárnutí. Navíc deska silové části byla podle mého názoru nevhodně umístěna přímo na motoru, kde se k vibracím vrtulníku přidalo tepelné namáhaní součástek od rozehřátého motoru. Vlivem zmíněných podmínek byly cesty na desce plošných spojů v místech spojení s motorem vypálené, cínové spoje součástek trpěly tzv. studeným spojem. Nejmarkantněji se tento jev projevoval u výkonového tranzistoru, který byl nejvíce namáhán vibracemi – z důvodů zcela nevhodného chlazení (přívodní kontakty tranzistoru nesly celou tíhu tranzistoru i chlazení).

Z těchto důvodů jsem novou desku silové části přesunul pod vrtulník, přičemž výkonový tranzistor, který je s deskou spojen metalickými vodiči, jsem umístil na nosnou konstrukci kloubu č. 1 vyrobenou z hliníku. Toto řešení zajišťuje díky dobrému odvodu tepla hliníkem a velké ploše konstrukce, na které dochází k přenosu tepla dostatečné chlazení tranzistoru a zamezuje jeho opětovnému vyklepání (obr. 6.8)



Obr. 6.8 Deska silová část PWM

Na obr. 6.9 je schéma spínacího obvodu motoru společně s typickými průběhy PWM. Pro názornost je zde vyobrazena i část obvodu skládající se z tranzistoru T1 a odporů R1 a R2, která je součástí desky PCB No.1. Popis činnosti obvodu je součástí odstavce 6.3.2.3.



Obr. 6.9 Silová část PWM

6.2 Systém pro sběr dat

Každý sofistikovaný regulační algoritmus potřebuje ke své činnosti zpětnou vazbu. V regulační úloze řízení vrtulníku představuje požadovanou zpětnou vazbu znalost o poloze, která je pomocí systému pro sběr dat přenášena do počítače, ve kterém je naimplementován řídicí algoritmus. Systém pro sběr dat je tvořen dvěma nezávislými přenosovými kanály. První kanál tvoří PCB No.1, Interface a V/V karta PCI 1711. Druhý kanál PCB No.2, Interface a V/V karta PCI 1711. Oba přenosové kanály jsou svým vnitřním zapojením a funkcí prakticky totožné. Z daného důvodu popis v následujícím textu tam, kde není uveden rozdíl, platí pro oba systémy.

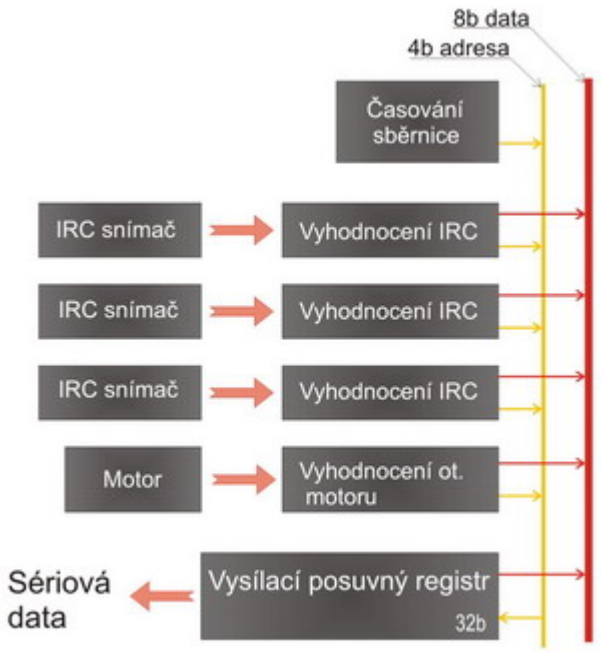
Celé zapojení pro snímání polohy a sběru dat bylo z důvodů velké obvodové náročnosti a snaze co nejmenšího plošného spoje vyřešeno pomocí velkokapacitních programovatelných logických polí (PLP) Xilinx Xc 3042, použitých jak v deskách PCB, tak v obvodu Interface. (podrobnosti viz příloha B). Moje snaha plynoucí ze zadání diplomové práce byla tuto koncepci za podmínky její funkčnosti v co největší míře zanechat. Po zkonstruování nové desky PCB No. 1 na nepájivém poli byl celý systém pro sběr dat podroben dlouhodobému testování.

Činnost navrženého systému se prokázala v zásadě jako funkční, proto nebyl důvod pro zásah do vnitřní struktury implementované v programovatelných logických polích. V následujícím textu uvedu popis činnosti obvodů doplněnou o blokové diagramy. Zájemce o detailní popis vnitřního zapojení odkazuji na [5], [6]. Případná změna vnitřní struktury by byla problematická i z důvodu, že v současné době na fakultě neexistuje vývojový software pro daná logická pole.

6.2.1 Zpracování a přenos dat

6.2.1.1 Zpracování dat z IRC snímačů polohy

Obvody pro vlastní zpracování dat z IRC snímačů polohy jsou v deskách PCB No. 1 a PCB No.2 naimplementovány v programovatelných logických polích Xilinx. Každá deska zpracovává signál ze tří snímačů polohy, přičemž zpracované údaje jsou sériově vysílány do interface. Deska PCB No.1, určená pro umístění na vrtulníku, navíc obsahuje v programovatelném poli obvody pro zpracování signálu ze snímače otáček, a jak již bylo popsáno v části 6.1.3, i obvody pro generování PWM signálu řídicího motor. Blokové schéma na obr. 6.10 názorně popisuje činnost obou desek PCB No.1 a PCB No.2, až na výše uvedené rozdíly.



Obr. 6.10 Blokové schéma zpracování signálů v PCB No.1

Fázově posunuté signály z inkrementálních snímačů jsou pomocí obousměrných čítačů převedeny na absolutní hodnotu. Přestože je údaj o absolutní poloze vícebitový, je délka přenášených slov omezena z důvodů jednodušší realizovatelnosti a rychlosti přenosu na 8 bitů. Vzhledem k tomuto řešení je poloha udávaná zařízením pouze relativně s větší periodou neurčitosti. Na tuto skutečnost se musí brát zřetel při rekonstrukci polohy v počítači. Perioda vzorkování nesmí být větší než doba, za kterou se osmibitový číslicový údaj změní o více jak 127 kroků. Pokud by jsme nevyhověli této podmínce, nedokážeme na straně počítače rekonstruovat směr pohybu a absolutní polohu.

Základem pro vyhodnocení signálu ze snímače otáček je čítač čítající po dobu 227 ms přicházející pulzy. Výsledek vždy po skončení čítání (čtyřikrát za sekundu) přepsán do registru, kde je k dispozici pro další zpracování. Jeden krok čítače v měřící periodě představuje 0,22 ot/sec nosného rotoru, což jsou nejmenší možné měřitelné otáčky. Minimální otáčky motoru jsou vyšší, proto je uvedená přesnost měření dostačující..

Zpracovaná, osmibitovými slovy reprezentovaná data ze snímačů, jsou po vnitřní sběrnici uvnitř programovatelného logického pole přenášena postupně za sebou do vysílacího shift registru, odtud jsou sériově vysílána. Vhodným časováním jednotlivých bloků vyhodnocení IRC snímačů je zajištěno, aby v době přenosu dat nedocházelo k změně údaje čítače. Jednotlivé zdroje zpráv přistupují na sběrnici cyklicky v pevně stanoveném pořadí, přičemž jednotlivé přenosy jsou od sebe vzdáleny o 222.2 µs (délka vysílacího rámce).

Poznámka: Z pohledu diskrétního řízení spojitého systému reprezentuje popisovaný způsob získávání dat asynchronní vzorkování, přičemž jednotlivé vzorky jsou od sebe posunuty o již zmíněnou hodnotu 222.2 µs. Při návrhu regulačních algoritmů se musí tato skutečnost zohlednit.

6.2.1.2 Vysílací rámec

Přijatá data jsou ve vysílacím shift registru doplněna o synchronizační značky a adresu zdroje, čímž vznikne sériově vysílané 32 bitové slovo. Tvar vysílaného sériového slova je na obr. 6.11.

Obr 6.11 Vysílací rámec

Vysílané slovo je složeno ze 4 osmibitových slabik. Každá slabika začíná dvěma startovacími bity, kde první bit je log1 a druhý bit je log0. První slabika slova je synchronizační a jejích zbývajících šest bitů obsahuje samé log.1, čímž je tato posloupnost díky sudé paritě, použité u zbývajících slabik, unikátní a umožňuje tak synchronizaci začátku slova. Následující tři slabiky nesou za startovacími bity čtyři datové bity, kde každá dvojice je zajištěna sudou paritou, přičemž datové bity se vysílají postupně od nejméně významného bitu. Druhá slabika slova nese ve svých datových bitech adresu zdroje. Osmibitová přenášená data jsou rozdělena do datových bitů ve třetí a čtvrté slabice tak, že méně významná čtyřbitová půlka je obsahem třetí slabiky a významnější je obsahem slabiky čtvrté.

Každý obvod PCB No.1 a PCB No.2 obsahuje čtyři zdroje osmibitových zpráv, přičemž data z jednotlivých zdrojů obsažená ve vysílaných slovech každé desky jsou, jak již bylo naznačeno, vysílána vlastním přenosovým kanálem postupně za sebou. Jednotlivá data jsou jednoznačně identifikována pomocí adresy obsažené ve vysílacím slovu. Při chybě v přenosu tak dojdeme pouze o slovo, kde se chyba vyskytla. Korektní data jsou podle adresy uložena správně (nezáleží na pořadí slov).

Poznámka: Deska PCB No.2 zpracovává data pouze ze tří zdrojů dat. Z tohoto důvodu čtvrté vysílané slovo obsahuje pouze náhodná data, přičemž na přijímací straně je toto slovo podle adresy rozpoznáno a zapomenuto. Čtvrtý kanál zůstal u desky z důvodu, aby nebylo nutné předělávat vnitřní zapojení.

6.2.1.3 Charakteristiky přenosu

Použitý způsob přenosu je z hlediska teorie informace sériový, arytmický, jednosměrný simplexní přenos, který neumožňuje zpětnou kontrolu přijatých dat.

Rychlost sériového vysílání je 144 kb/s. Na jeden bit tudíž připadá šířka 6,94 µs. Vysílaný paket obsahující 32 bitů trvá 222,2 µs, tudíž za jednu sekundu je při bezporuchovém provozu vysláno 4500 slov. Protože v jednom kanálu vysíláme data ze čtyř zdrojů, je opakovací frekvence jednoho zdroje 1125 Hz. Tento kmitočet pro nás představuje maximální možný vzorkovací kmitočet jednoho snímače polohy.

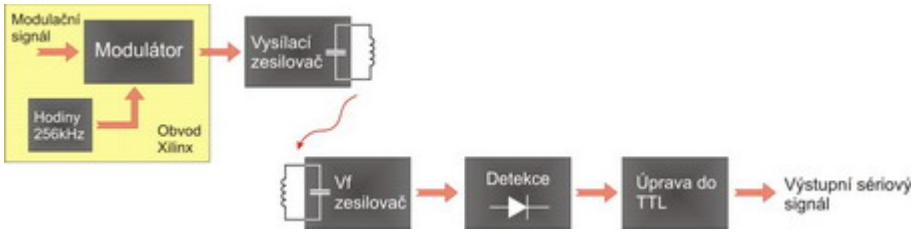
Počítač se musí jako regulační člen starat nejen o sběr dat ze dvou vstupních kanálů, ale také o jejich zpracování, vyhodnocení a následné zpětné povelové řízení vrtulníku. Každá tato úloha zabírá počítači jistý strojový čas navíc. Maximální vzorkovací frekvence jádra RT Toolboxu je také omezená. Z těchto důvodů je rychlost použitého vzorkování i při uvažování chybných přenosů postačující.

6.2.1.4 Použité přenosové cesty

U původního řešení byla část přenosové cesty prvního přenosového kanálu realizována pomocí bezdrátového přenosu. Model vrtulníku nesl vysílač, přijímač byl umístěn pod helipotrem. Přijatá data byla poté z heliportu posílána do obvodu Interface metalickou přenosovou cestou. Druhý přenosový kanál byl postaven na metalické přenosové cestě. Tato koncepce zůstala zachována beze změn.

Bezdrátová přenosová cesta prvního kanálu byla založena na modifikované 100% ASK modulaci (nosný signál nebyl harmonický, ale byl založen na signálu z řídicího krystalu 18,432 MHz). Modulovaný signál vytvářený přímo uvnitř PLP Xilinx byl vyveden na výstupní zesilovač tvořený tranzistorem PNP s rezonančním obvodem v kolektoru, přičemž cívka rezonančního obvodu sloužila zároveň jako vysílací anténa.

Stejná koncepce byla použita i na přijímací straně. Signál z přijímací cívky rezonančního obvodu byl zesílen pomocí VF zesilovače; z jeho výstupu prošel detekcí a poté byl upraven na úrovně TTL (obr. 6.12). Zájemce o podrobnější popis původního řešení odkazuji na [5], [6].



Obr. 6.12 Bezdrátový datový spoj

Výše popsaný systém byl sice z hlediska realizace a principu jednoduchý. Bohužel při zapnutém motoru a vzdálenosti antén větší jak 5 cm klesal počet korektně přenesených zpráv na nulovou hodnotu. I přes snahu o naladění a úpravu obvodů se nepodařilo spolehlivost zvýšit. Takový datový spoj je z hlediska řízení vrtulníku neakceptovatelný, a proto bylo nutné naleznout náhradní řešení.

Zprvu jsem přemýšlel o návrhu nové bezdrátové přenosové cesty založené na vyšším digitálním principu modulace, s větší odolností vůči vnějšímu řešení. Tato cesta se ukázala jako neschůdná. Vyřešit daný úkol představuje velmi náročný problém. Přenosová cesta by nesměla rušit původní RC soupravu. Navíc bych musel zajistit, aby vysílač spadal mezi tzv. pomocné vysílače, které nepodléhají registraci. To sebou nese omezení vysílacího výkonu a nutnost absence antény s větším ziskem. Na straně přijímače tak vznikají problémy s korektní rekonstrukcí signálu na větší vzdálenost. Při použití výkonnějšího vysílače vznikají problémy s potřebnou registrací.

Jako druhý způsob se nabízí použít některé z průmyslových bezdrátových řešení, jako je systém bluetooth (zamítnuto kvůli ceně výrobku), nebo některý z hybridních vysílačů/přijímačů pracujících v modelářském pásmu 433 MHz. V této kategorii jsem hledal na trhu dostupné výrobky, bohužel i přes použité frekvenční pásmo žádný z nabízených produktů neumožňuje přenos sériových dat o frekvenci 144 kHz.

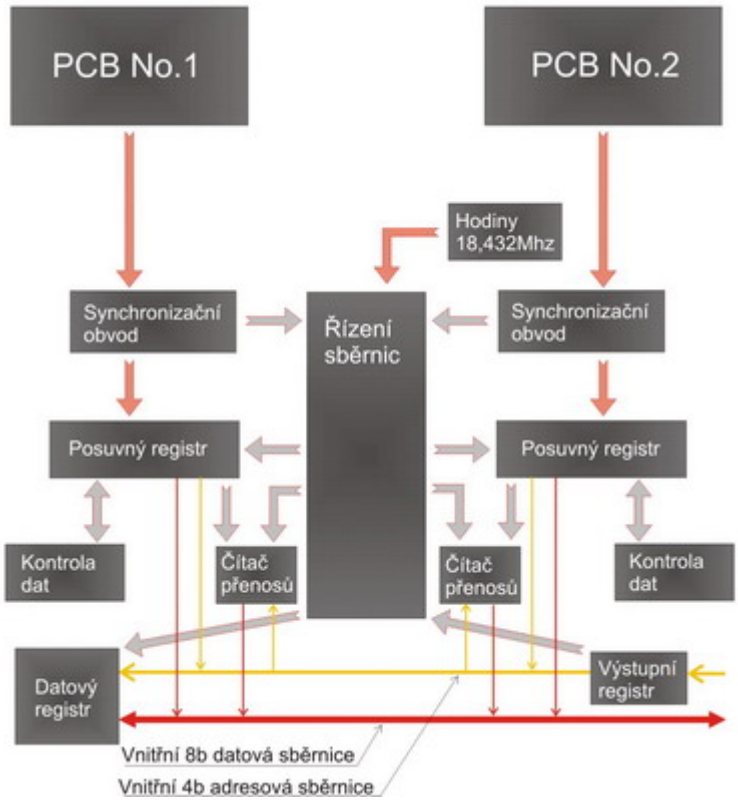
Po těchto úvahách byl problém vyřešen pomocí nejjednoduššího možného řešení – metalickou přenosovou cestou, tvořenou slabou dvoulinkou, kterou jsem vložil mezi původní metalickou cestu a vrtulník. Řešení sice není tak efektní jako předchozí uvedené možnosti, ale pro náš účel dostačuje (u vrtulníku se nepředpokládá jeho neupoutaný pohyb, navíc je vrtulník napájen pomocí dvoulinky, která je mnohem širší a tím mění dynamiku mnohem víc jako dvoulinka datová). Nesmíme opomenout skutečnost, že toto řešení navíc přináší žádanou úsporu hmotnosti vrtulníku. Do budoucna lze modulovaný kanál č.1 vést napájecím kabelem. Tímto se ušetří jedena metalická cesta a zlepší letové vlastnosti modelu.

Sériová data z obou přenosových kanálů jsou z heliportu do Interface fyzicky posílána přes pětimetrový kabel opatřený na obou koncích devítivývodovým kabelem Canon. Kabelem je napájen obvod PCB No.2.

6.2.2 Komunikace Interface – PC

6.2.2.1 Vnitřní architektura v Interface

Data ze dvou sériových linek jsou přijímána obvody v programovatelném logickém poli Xilinx. Zde jsou podle adresy rozdělena do příslušných registrů, a poté v paralelní formě poskytnuta počítači. Blokové schéma systému viz obr. 6.13.



Obr. 6.13 Přenos dat v Interface

Sériová data z každého kanálu jsou přijata synchronizačním obvodem. Zde dojde pomocí synchronizační slabiky k detekci začátku bloku a k synchronizaci přijímacího časovače. Vzorkování dat v rámci vysílaného slova probíhá v půli bitu.

Data jdou ze synchronizačního obvodu do přijímacího posuvného registru dlouhého 32 b (délka celého vysílacího slova). Po jeho naplnění dojde ke kontrole dat. Pokud při přenosu nedošlo k žádné detekovatelné chybě, jsou příslušná data podle adresy zdroje přes vnitřní sběrnici obvodu Xilinx uložena do příslušných datových registrů, kde se uchovávají do nové aktualizace.

Výstupní registr má za úkol oddělovat adresu dodanou počítačem od vnitřní sběrnice a na základě této přijaté adresy a signálu RD generovat žádost o přenos dat z vnitřních datových registrů. Po předání sběrnice se data objeví na vnitřní sběrnici, která je vyvedena ven z obvodu Xilinx. Data jsou zaznamenána v oddělovači, jehož obvod je reprezentován jednosměrným třístavovým budičem 74HCT373 (obvod je řízen z PLP Xilinx), který odděluje vnitřní sběrnici od simulované sběrnice 8080, popsané v odstavci 6.1.1.2. Data tudíž mohou proudit pouze jedním směrem, a to do počítače.

Jak z výše uvedeného vyplývá, vnitřní sběrnice je sdílena třemi zdroji dat. Z tohoto důvodu musí existovat obvod pro správu sběrnice. Tento obvod přiděluje sběrnici jednotlivým zdrojům na základě žádostí podle principu fronty. Pouze tehdy, kdy žádosti přijdou ve stejný okamžik je rozhodnuto podle pevně stanovené priority. Žádost počítače je nadřazena ostatním zdrojům, proto počítač nesmí opakovat čtení s kratší periodou než 1,5 µs. V případě nedodržení této podmínky by datům z PCB No.1 a PCB No.2 nebyla přidělena sběrnice, tudíž by nemohla být zapsána do registrů a počítač by četl staré neaktuální hodnoty.

Mimo zmíněné obvody, starající se o přenos dat, jsou součástí Interface kontrolní obvody. V adresovém prostoru datových registrů se jedná o pevnou paměť obsahující kontrolní řetězec PK&JF a dva čtyřbitové čítače čítající počet korektních přenosů z přijímacích posuvných registrů do datových registrů (v ideálním případě by měl být počet přenosů v každém kanálu roven 4500 za 1 s). Čítače registru jsou nulovány přečtením kteréhokoliv znaku kontrolního řetězce. Zmíněné obvody využívá softwarová diagnostika hardwarové části (kapitole 7, oddíl 7.4).

6.2.2.2 Komunikace z hlediska PC

Pro obvod Xilinx, uložený v Interface, je vyhrazen adresní prostor na simulované sběrnici systému 8080, popsán tabulkou 6.6. Čtecí cyklus sběrnice 8080 byl popsán v 6.1.1.2. Maximální doba potřebná k dodání dat t je v případě přijímacího obvodu Xilinx asi 870 ns. Toto zpoždění je dáno z důvodů sdílení vnitřní sběrnice třemi zdroji.

Význam registru	Adresa
Zdroj dat: PCB No.1	
Příčný náklon vrtulníku	10000B
Podélný náklon vrtulníku	10001B
Kurz modelu	10010B
Otáčky nosného rotoru	10011B
Zdroj dat: PCB No.2	
Příčný náklon tyče	10100B
Podélný náklon tyče	10101B
Vysunutí tyče	10110B

Tab. 6.6 Rozložení datových registrů

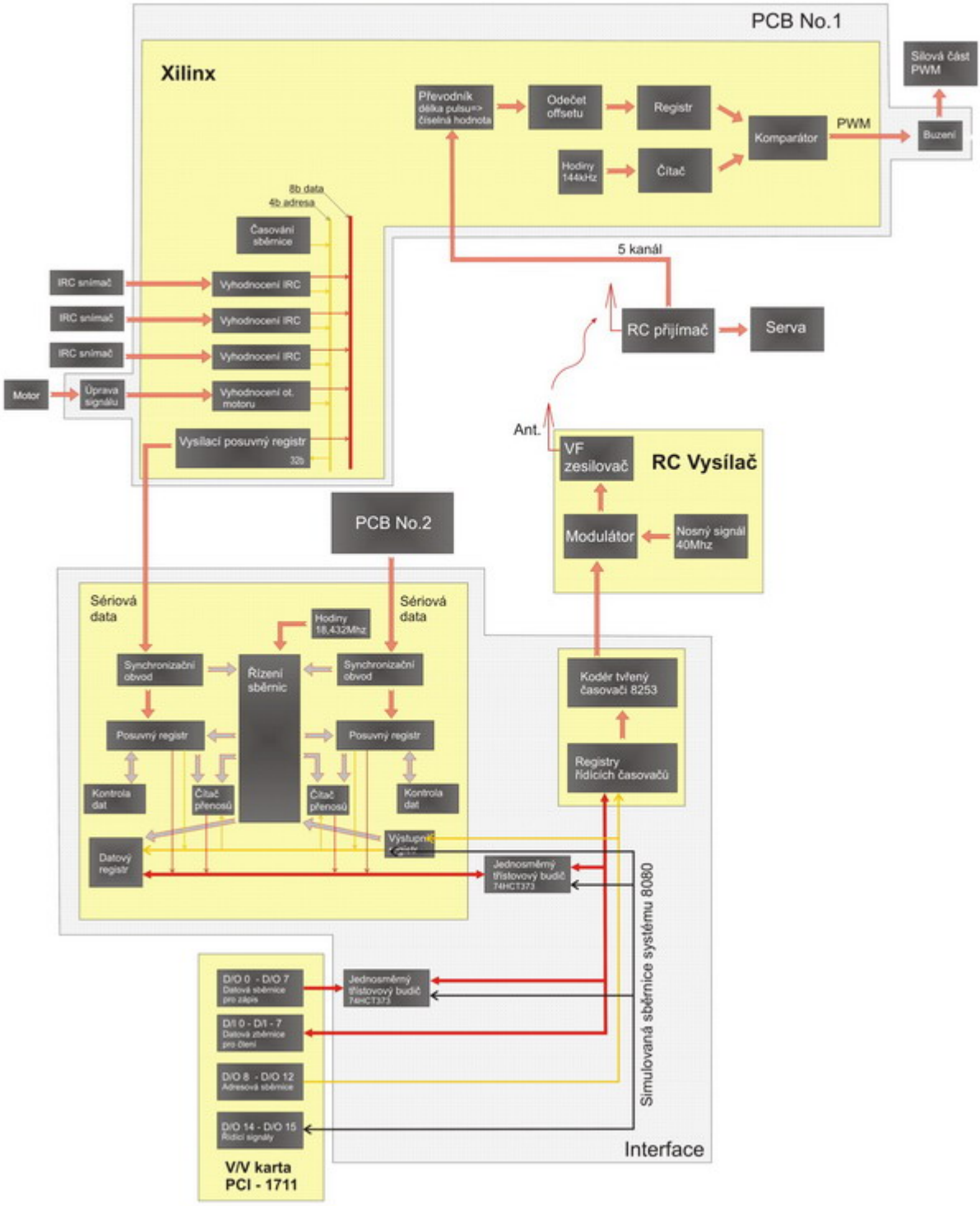
Připomínám, že při bezporuchovém provozu se do jednoho registru, ve kterém jsou ukládána data z jednoho čidla, provede maximálně 1125 přenosů za sekundu. Z daného vyplývá, že minimální možná smysluplná vzorkovací perioda čtení z tohoto registru je z pohledu PC je jedna milisekunda. Zvyšování rychlosti pod 1 ms vede k tomu, že jsou opakovaně čteny z registru stejné hodnoty. Tím se zbytečně zahlcuje interní sběrnice PLP Xilinx.

Tabulka 6.7 popisuje adresní prostor kontrolních obvodů.

Význam registru	Adresa
Čítač přenosů z PCB No.1	11000B
Čítač přenosů z PCB No.2	11001B
Kontrolní slovo P	11011B
Kontrolní slovo K	11100B
Kontrolní slovo &	11101B
Kontrolní slovo J	11110B
Kontrolní slovo F	11111B

Tab. 6.7 Rozložení kontrolních registrů

Na závěr jsem připojil blokové schéma celkové koncepce řízení vrtulníku, obsahující všechny uvedené části systému povelového řízení a systému pro sběr dat , včetně jejich vazeb (obr. 6.14).



Obr. 6.14 Blokové schéma řízení vrtulníku

6.3 Deska PCB No.1

Deska plošného spoje PCB No.1 přijímá, upravuje a v sériové podobě vysílá signál ze tří inkrementálních snímačů úhlu natočení pracujících v kloubu č.1 a z čidla otáček. Navíc generuje na základě pátého kanálu RC soupravy PWM signál pro řízení motoru.

6.3.1 Stav původní desky

Původní deska plošných spojů trpěla mnohými závadami, které znemožňovaly její spolehlivou činnost. Mezi nejzávažnější z nich patřily chybějící části měděných vodičů na desce plošných spojů. Cínové spoje trpěly tzv. studenými spoji. Na desce byly mnohé spoje řešeny metalickými propojkami s pevným jádrem, které se i po sebemenším dotyku utrhly. Mnohé z těchto chyb byly způsobeny tím, že deska PCB No.1 je umístěna přímo na vrtulníku, čímž je vystavena značným otřesům při činnosti. Dále zde byl nezanedbatelný časový vliv úměrný stáří systému. Navíc v době mezi rokem 1995, kdy na modelu obhájili své diplomové práce pan Ing. Krsek a pan Ing.Fojtík, a začátkem naší práce datované rokem 2003 proběhly na vrtulníku mnohé bezvýsledné pokusy o oživení systému, při kterých docházelo k neuváženým zásahům do desky plošných spojů a následkem opakovaného pájení došlo k přerušení vodivých cest.

Z těchto důvodů jsem se rozhodl desku PCB No.1 zkonstruovat na základě původní desky znovu.

6.3.2 Obvodové zapojení

V kapitole bude popsáno obvodové zapojení nové desky, které vychází z desky staré. Část součástek, které byly osazeny na původním výrobku, se dnes již nevyrábí. Proto jsem je nahradil novými. S tím souviselo i uzpůsobení zapojení. Zde bych chtěl upozornit, že obvodová dokumentace uvedená v [5], [6] neodpovídá na 100 % skutečnosti u původních desek PCB No.1, PCB No.2 a Interface. (nejzávažnějším problémem jsou si neodpovídající piny obvodu Xilinx.). Proto při případné rekonstrukci desky musí dojít k její celkové analýze.

6.3.2.1 Obvod Xilinx

Základem obvodového zapojení je obvod Xilinx, který v sobě realizuje snímání a sběr dat. Tuto koncepci jsem zanechal z důvodů uvedených v kapitole 6.2. Vnitřní zapojení je přehledně popsáno v [5], [6].

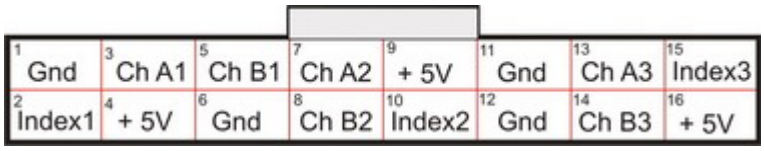
Obvod Xilinx je spojen s pevnou sériovou konfigurační pamětí XC1736 označenou jako obvod IO2. Při každém spuštění desky proběhne z paměti nahrání konfiguračních dat do obvodu. Původní deska navíc obsahovala obvody umožňující konfiguraci obvodu z počítače, při kterých musela být sériová paměť ze své patice vyjmuta, jinak by mohlo dojít k jejímu zničení. Tato funkce již nebyla z našeho pohledu nutná, proto z tohoto hlediska a z bezpečnostních důvodů jsem tuto část odstranil.

Z obvodového hlediska je důležité, že vstupy a výstupy PLP Xilinx pracují s 5V logikou TTL.

6.3.2.2 Inkrementální snímače polohy

V oddílu 5.2 byly uvedeny charakteristiky a popis použitých IRC snímačů polohy. Připomeňme, že výstupy daných čidel, jejichž hrany jsou dostatečně strmé pro další zpracování, mají úrovně definované pro TTL logiku. Vzhledem k této vlastnosti nebyla nutná další hardwarová úprava výstupních signálů.

Vlastní připojení signálů z inkrementálních snímačů je provedeno dvacetivývodovým samořezným konektorem. Na obr. 6.15 je schéma příslušného konektoru s popisem. Připojení snímačů k vývodům obvodu Xilinx je v tab. 6.8.



Obr. 6.15 Konektoru IRC snímačů

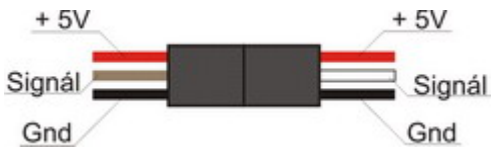
Význam signálu	Snímač	Vývod obvodu Xilinx
Ch A1	Příčný náklon	29
Ch B1		28
Index 1		30
Ch A2	Podélný náklon	21
Ch B2		20
Index 2		19
Ch A3	Kurz	16
Ch B3		15
Index 3		14

Tab. 6.8 Připojení snímačů k PLP Xilinx

6.3.2.3 Snímače otáček a budící obvod motoru

Výstupní signál otáčkoměru, jehož průběh je zobrazen na obr. 5.8, je k přímému zpracování v programovatelném logickém poli nevhodný. Pro vstup do logického pole musel být upraven na úroveň signálů TTL. Vlastní úpravu signálu obstarává obvod na obr. 6.17, označeném jako obvod SO.

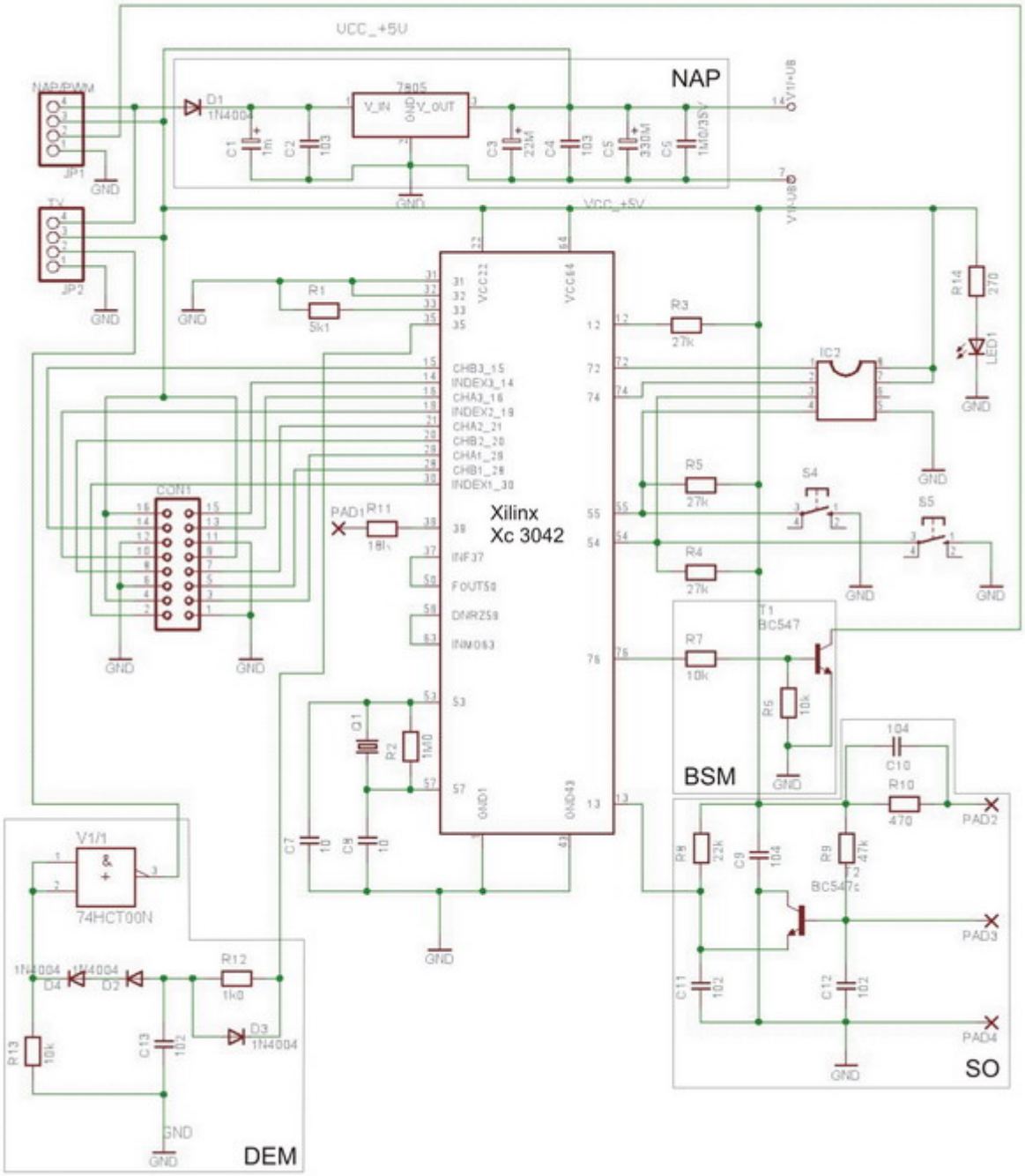
Výstup čidla otáčkoměru je do desky PCB No.1 přiveden třížilovým kabelem, kterým vede k čidlu napájení. Aby bylo možné s deskou manipulovat, musí být daný spoj rozebíratelný. To je realizováno pomocí počítačových konektorů (samice na straně desky, samec na straně čidla) umístěných na vodiči. Zapojení konektorů společně s barvami a významem vodičů je na obr. 6.16.



Obr. 6.16 Konektor snímače otáček

Při rozebírání a sestavování spoje je potřeba jednotlivé konektory zapojit správně, jinak dojde k prohození napájení a tím k destrukci čidla!!!

Schéma obvodu pro buzení spínače motoru je součástí schématu uvedeném na obr. 6.7 a obr. 6.17 (Obvod BSM). Tranzistor T1 společně s danými odpory slouží k výkonovému buzení vodiče spojujícího desku silové části PWM s deskou č.1 a zároveň i k ochraně vývodu velkokapacitního programovatelného pole Xilinx.

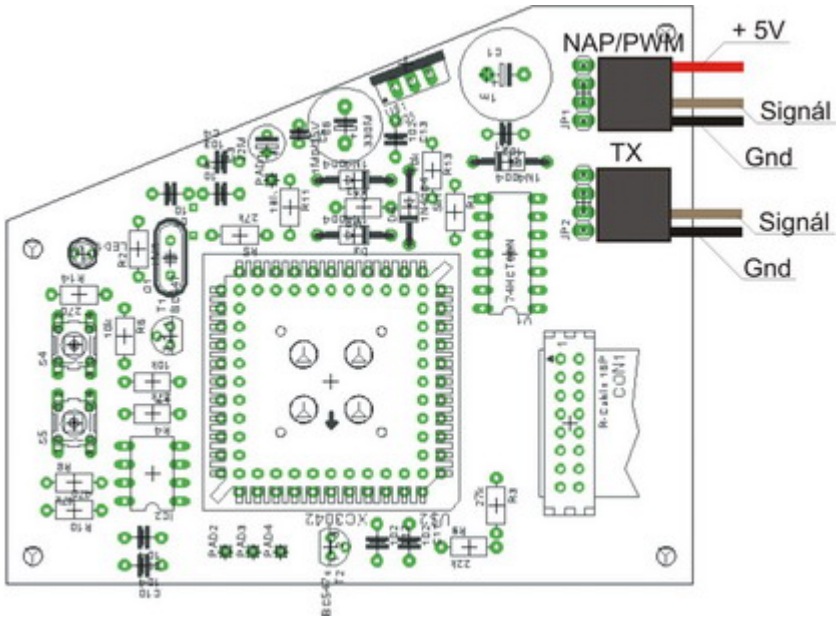


Obr. 6.17 Obvodové schéma PCB No.1

6.3.2.4 Napájecí zdroj desky

Z důvodu, že PLP Xilinx vyžaduje ke své činnosti napájecí napětí 5 V, je součástí desky PCB No.1 zdroj stejnosměrného napětí založený na stabilizátoru 7805 (obvod NAP. na obr. 6.15) doplněný o filtrační kondenzátory.

Obvod je napájen z obvodu silové části PWM třívodičovým kabelem vedeným do konektoru NAP/PWM na desce PCB No.1. Třetím vodičem vede k motoru signál PWM řídicí motor. Konektor není zabezpečen proti prohození vývodů, které by mělo pro desku PCB No.1 katastrofální následky (dojde k prohození napájení), tudíž při zapojování konektoru podle obr. 6.18 je nutná patřičná opatrnost.



Obr. 6.18 Konektory umístěné na PCB No.1

6.3.2.5 Připojení pátého kanálu z RC

Pátý kanál vyvedený z RC vysílačky je dvoulinkou přiveden přímo do desky PCB No.1, protože daný spoj je až na počet vodičů totožný se spojem popsaným v odstavci 6.3.2.3 proto musíme se dát pozor na správné propojení vodičů podle obr. 6.15.

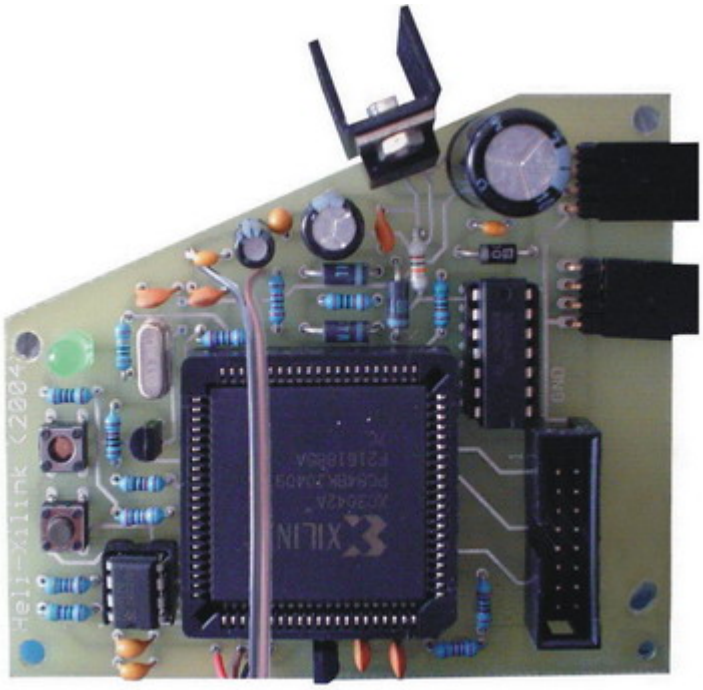
6.3.2.6 Vysílač dat

Pro přímé propojení výstupu desky PCB No.1 a obvodu Interface jsem musel upravit ASK modulací modulovaný výstupní sériový signál z obvodu Xilinx na úroveň TTL. Tuto operaci zabezpečuje jednoduchý demodulátor obsahující RC článek a logické hradlo NAND sloužící jako výstupní člen (obr. 6.15 obvod DEM).

Výstup z logického hradla NAND je přes konektor Tx (obr. 6.17) spojen přes propojku pod heliportem s obvodem Interface. Tak jako v předešlých případech je nutno dát při zapojování pozor na nebezpečné prohození vývodů (obr. 6.18).

6.3.2.7 Deska plošných spojů

Na obr. 6.16 byla vyobrazena deska plošných spojů vytvořená v programu Eagle. Pro úplnost obr. 6.18 zachycuje zrealizovanou desku.

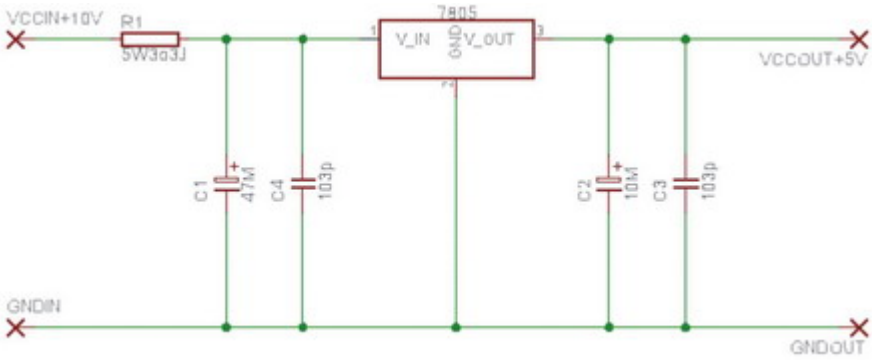


Obr. 6.19 Deska PCB No.1

6.3.3 Zdroj napájení serv a RC přijímače

Napájení původního RC modelu bylo vyřešeno akumulační baterií, kterou nesl vrtulník pod trupem. Serva a RC přijímač vyžadují napájecí napětí pohybující se mezi 4,7 a 7 Volty. Po přivedení 10V napětí napájecího zdroje motoru byl zkonstruován 5V zdroj pokrývající energetické požadavky serv a přijímače. Původní zdroj, jako všechny obvody na vrtulníku, byl ve velmi špatném technickém stavu a pro svou nespolehlivost musel být vyměněn.

Schéma zapojení zdroje zachycuje obr. 6.20. Základem konstrukce je, tak jako v případě napájecího zdroje PCB No.1, integrovaný obvod 7805 doplněný o filtrační kondenzátory a sériový odpor, který zmenšuje výkonové zatížení stabilizátoru.



Obr. 6.20 Napájecí zdroj RC

Zdroj je pevně spojen se spínačem motoru, na který je přivedeno 10V napájecí napětí. Připojení přijímače je realizováno pomocí modelářského konektoru zakončujícího dvoulinku ze zdroje a konektorem na straně přijímače. K záměně při připojování nemůže přijít. Přes přijímací obvod jsou napájena a řízena jednotlivá serva. Zrealizovaná deska je zachycena na obr. 6.21.

Obr. 6.21 Deska napájení RC

Poznámka: Výše popsaný zdroj není součástí PCB No.1, Do oddílu 6.3 byl popis zařazen z důvodu malého rozsahu a snahy o kompletní výčet nových obvodů zrealizovaných na modelu.

Poznámka: Schémata obvodového zapojení nových částí společně s příslušnými deskami plošných spojů jsou uložena v zdrojových souborech programu Eagle na přiloženém CD. Ve stejném adresáři naleznete použitou verzi programu.

Poznámka: Vzhledem k tomu, že deska PCB No.2 pracovala korektně, nedošlo k její výměně. Pokud by se časem objevily problémy, lze ji podle popisu PCB No.1, po vypuštění přebývajících částí (obvod NAP, SO , BSM, DEM), zhotovit. Pro správnou funkci je jen nutné vložit sériovou konfigurační paměť s programem pro Xilinx desky PCB No.2.

7 Softwarová část projektu

Kapitola podává přehled o nově implementované softwarové části projektu, na kterou se zaměřil můj kolega Hynek Bury. V následujících odstavcích budou zjednodušeně popsány použité Toolboxy a programové vybavení pro čtení, zápis a vyhodnocení dat. V posledním části naleznete popis GUI aplikace. Zájemce o vyčerpávající informace odkazuji na diplomovou práci [1], v oddílu 6.1 je uvedena analýza stavu původního softwaru.

7.1 Použité Toolboxy

Jak již bylo uvedeno v kapitole 4, úloha řízení vrtulníku je implementována ve vývojovém prostředí Matlab 6.5. Pro řízení v reálném čase pomocí V/V karty využíváme funkce a možnosti Real Time Toolboxu. Pro vizualizaci chování vrtulníku je využit Virtual Reality Ttoolbox. Oddíl se zabývá pouze charakteristikami uvedených Toolboxů. Popis a význam použitých příkazů naleznete v [1].

7.1.1 Real Time Toolbox verze 3.11

Software vyvinutý firmou Humusoft umožňuje přenos dat mezi V/V zařízením počítače a jádrem Matlabu. Vstupně/výstupní karta je řízena pomocí zavedeného ovladače. Data jsou získávána ze vstupu karty, respektive zapisována na její výstup pomocí uživatelem nadefinovaných a řízených časovačů, a to těmito dvěma možnými způsoby:

- jednotlivý zápis/čtení,
- hromadný zápis/čtení.

U jednotlivého zápisu/čtení přistupujeme k vstupům, respektive výstupům, karty bit po bitu. U hromadného zápisu/čtení je využita tzv. historie dat. Zde je nadefinována velikost zásobníku pro čtení, respektive zápis. S takto definovaným blokem dat můžeme pracovat současně, což nám umožňuje čtení, respektive zápis, na vstupní, respektive výstupní, bity karty zároveň. Tato možnost je z hlediska zpracování dat mnohem efektivnější než dříve uvedená, proto v programu při implementaci dostala přednost.

7.1.2 Virtual Reality Toolbox verze 3.1

Jde o nástroj pro práci s vektorovou 3D grafikou. Virtuální model vrtulníku byl zkonstruován pomocí VRL editoru (nástavba pro vytváření trojrozměrných modelů). Virtuální model je tvořen objektovými proměnnými. Pomocí funkcí obsažených v Toolboxu zprostředkováváme přenos dat (v našem případě údaj o poloze) mezi jádrem Matlabu a virtuálním modelem vrtulníku. Model je ovládán změnou parametrů objektových proměnných.

7.2 Perioda vzorkování

V systémech digitální regulace je volba periody vzorkování velmi důležitá. Při její špatné volbě jsou řídicímu algoritmu předloženy vzorky, ve kterých chybí podstatná informace o dynamickém chování řízeného systému. Perioda vzorkování je v praktických aplikacích omezena možnostmi softwaru i hardwaru.

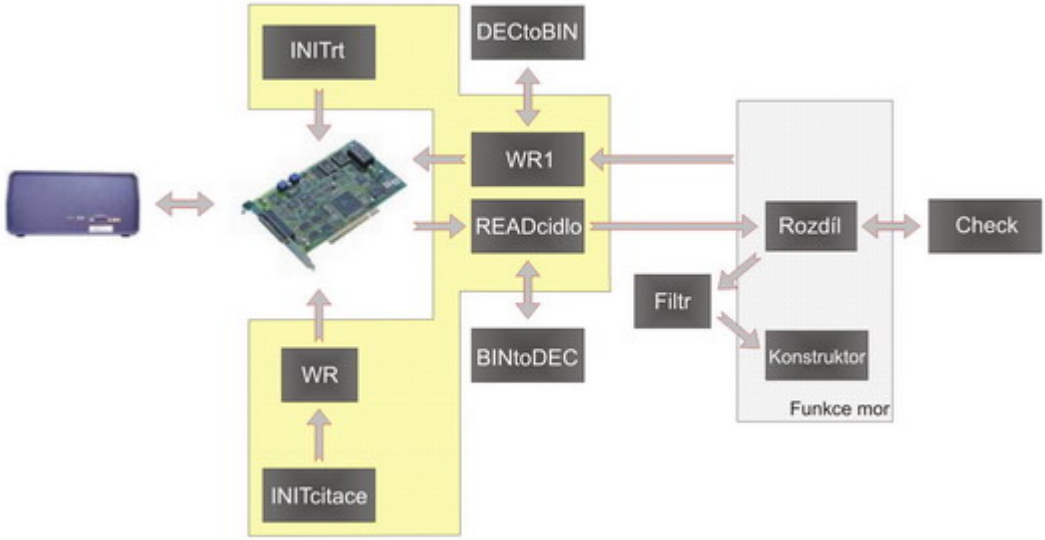
Důvody a příčiny hardwarového omezení dolní hodnoty periody byly popsány v odstavcích 6.1.1.2 a 6.2.2.1. Ze softwarového pohledu je nutné si uvědomit, že v rámci jedné periody musíme data získat, zpracovat, vyhodnotit regulačním algoritmem a předat k monitorování. Horní omezení spočívá v nutnosti rekonstrukce polohy z osmibitových dat (odstavec 6.2.1.1). Nesmíme také opomenout, že pro správnou rekonstrukci je maximální perioda vzorkování daná Shannonovou větou [3].

Jak jsem již uvedl v oddíle 7.1.1, RT Toolbox používá ke čtení, respektive zápisu, uživatelem definované čítače. Jejich perioda je nastavitelná v širokém rozsahu hodnot. Vzhledem k uvedeným omezujícím podmínkám jsme pro naše účely zvolili periodu vzorkování všech použitých časovačů na 0,02 ms.

Podrobný popis filozofie a činnosti časovačů RT Toolboxu naleznete v [1].

7.3 Čtení a zápis dat

V oddíle popíšu programové vybavení pro získání dat, respektive jejich zápis. Blokové schéma je uvedeno na obr. 7.1.



Obr. 7.1 Blokové schéma pro čtení a zápis dat

Uvedené bloky programu jsou fyzicky naprogramovány jako funkce, které jsou řízeny hlavním obslužným souborem mor.m. V rámci tohoto souboru dochází k předávání získaných a zpracovaných dat mezi jednotlivé procedury. Části programu na žlutém podkladu využívají funkcí RT Toolboxu. V následujících podkapitolách bude uveden popis činnosti a funkce jednotlivých procedur. Zájemce o jejich fyzickou programovou konstrukci odkazuji na [1].

7.3.1 Inicializace laboratorní karty

Funkce **INITrt** je používána pro inicializaci karty, z tohoto důvodu musí být zavedena jako první. Po jejím spuštění dojde ke zrušení všech dříve nadefinovaných časovačů a ovladačů v RT Toolboxu. Poté provede inicializaci karty a nadefinuje čtyři časovače. První je určen pro zápis dat řízení (signály D/O0 – D/O7), druhým ovládáme signály řídicí vnitřní sběrnici v Interface (D/O14, D/O15). Třetím posíláme na sběrnici adresu cíle, respektive zdroje, dat (D/O8 – D/O12) a poslední čteme polohu vrtulníku (D/I0 – D/I7).

Údaje uvedené v závorkách představují vstupy a výstupy karty. Jejich význam je popsán v tab. 6.2. V RT Toolboxu jsou tyto hodnoty mapovány podle převodní tabulky 7.1.

Advantech PCI-1711	Real Time Toolbox
A/D0 – A/D 15	Inputs 1 – 16
D/A 1 – D/A 2	Inputs 1 – 2
D/I 0 – D/I 15	Inputs 17 – 32 in bit mode Inputs 17 – 20 in nibble mode Inputs 17 – 18 in byte mode Inputs 17 in word mode
D/O 0 – D/O 15	Inputs 3 – 18 in bit mode Inputs 3 – 6 in nibble mode Inputs 3 – 4 in byte mode Inputs 3 in word mode

Tab. 7.1 Převodní tabulka V/V karta – RT Toolbox

7.3.2 Inicializace řídicích časovačů 8253

Funkce **INITcitace** zajišťuje inicializaci časovačů 8253 podle postupu, který byl podrobně popsán v odstavci 6.1.2.3. Funkce ihned po inicializaci nastaví všechny časovače na nulovou hodnotu. Pro správnou funkci, z důvodů uvedených v odstavci 6.1.2.3, musí být k této hodnotě přičtena 256 (u průběhu vysílacího rámce z obr. 6.5 reprezentuje součet hodnotu šířky pulzu 1 ms)

Poznámka: Uvedené hodnoty jsou ve funkci uloženy přímo v binární formě, ve které se zapisují na výstup. Proto nemusí projít žádnou úpravou.

Pro zápis do jednotlivých registrů řídicích časovačů je využita funkce **WR**, která má stejnou funkci jako procedura WR1 (bude uvedena v odstavci 7.3.2) s tím rozdílem, že se zde nepoužívá historie dat, a tudíž pro každý použitý výstupní bit karty musí být použit samostatný časovač. Tento způsob zápisu je u inicializace použit z historických důvodů vývoje softwaru.

7.3.3 Funkce pro zápis

Funkce **WR1** slouží k ovládání jednotlivých serv a otáček motoru. Na vstupu funkce předpokládáme data reprezentovaná v dekadické formě a číselný údaj reprezentující adresu (viz tabulka 6.4 v [1]). Povolený rozsah dekadické hodnoty vstupující do funkce je 0 – 256, v případě zadání většího, respektive menšího, čísla je hodnota automaticky oříznuta na nejbližší extrém intervalu. Tak jako ve funkci WR se k hodnotě přičítá offset 256. Takto upravená dekadická hodnota je pomocí funkce **DECtoBIN** převedena do binární formy, která se zapisuje na výstup karty. Funkce používá tzv. hromadný zápis popsaný v 7.1.1.

7.3.4 Funkce pro čtení

Pomocí funkce **READcidlo** získáváme hodnoty z registrů (popsaných v odstavci 6.2.2.2). Hlavní funkce mor, tak jako v předešlém případě, při jejím volání dodá číslo kanálu, ze kterého se má číst. Uvnitř funkce dojde k převodu této reprezentace podle tab. 6.5, uvedené v [1], na skutečnou adresu registru, z něhož je přečtena binární hodnota. Ta se poté pomocí **BINtoDEC** převede na dekadickou hodnotu.

Dekadický výstup funkce je uložen do řídicí funkce mor; zde dojde k dalšímu zpracování hodnoty pomocí funkcí popsaných níže.

7.3.5 Rekonstrukce absolutní hodnoty

V odstavci 6.2.1.1 jsem se zabýval způsobem zpracování dat z IRC snímačů polohy. Z odstavce plyne, že osmi bitový údaj o poloze, uložený v příslušném registru v Interface, představuje pouze relativní hodnotu. Při rekonstrukci je nutno na tuto skutečnost brát zřetel.

Prvním článkem úlohy rekonstrukce polohy je rozdílový člen (blok **rozdíl**). Po vyčíslení rozdílu mezi aktuální a starou hodnotou ve funkci mor dojde k aktivaci funkce **chack**. Ta zkontroluje zda nedošlo k přetečení registru. Je – li rozdíl větší než 128 (polovina rozsahu registru) dojde ke korekci hodnoty.

Poznámka: Z tohoto důvodu nesmí bít stanovená perioda vzorkování větší než doba, za kterou se osmibitový číslicový údaj změní o více jak 127 kroků. Pokud by jsme nevyhověli této podmínce, funkce chack nebude pracovat správně.

Takto upravená hodnota projde blokem **filtr** do rekonstruktoru. V úloze filtr pracuje jednoduchý klouzavý filtr, který má za úkol omezit rušivé vlivy okolí.

Funkce **rekonstruktoru** se skládá ze dvou částí. První část transformuje vstupní rozdílovou hodnotu, v této formě představující počet dílků na čidle, do správné reprezentace pomocí vhodné konstanty. Velikost konstanty je odvozena od typu čidla a jeho použití (typ a umístění čidel je popsán v oddílu 5.2). V tabulce 7.2 jsou uvedeny velikosti konstant a jejich přiřazení k čidlům. Výpočet hodnot naleznete v [1], kapitola 6.1.1. Druhá část uchovává a aktualizuje pomocí přírůstků absolutní hodnotu. Ta je následně poskytována vyšším funkcím v aplikační hierarchii.

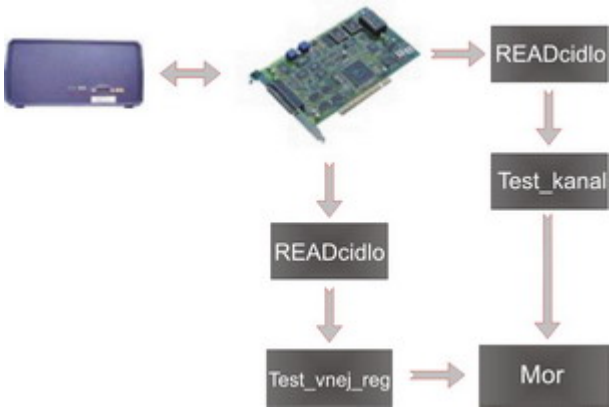
Poznámka: Při prvním zavolání funkce je absolutní hodnota implicitně nastavena na nulovou hodnotu.

Typ a funkce čidla	Konstanta
Typ BZ, snímač úhlu	K1 = 0.002901
Typ B, snímač úhlu	K2 = 0.003067
Typ B, vysunutí tyče	K3 = 0.1073865

Tab. 7.2 Konstanty pro převod do užitých jednotek

7.4 Diagnostika a kontrola hardware

Z kapitoly 6 vidíme, že popisovaný hardware patří svou architekturou mezi distribuované systémy. Data které jsou od sebe z pohledu daného systému značně vzdálena, jsou zde zpracovávána v jednotlivých částech kanálů postupně za sebou,. Toto řešení sebou nese nutnost propojení složitou strukturou datových a napájecích kabelů. Při špatném propojení datových kabelů dojde k přerušení komunikace. Přerušení napájení způsobí výpadek řídicích časovačů a při krátkodobém poklesu nefunkčnost programovatelného logického pole Xilinx. Zmíněné chyby a nekorektnosti mají za úkol odhalit dva níže popisované diagnostické testy (obr. 7.2).



Obr. 7.2 Blokové schéma diagnostiky

7.4.1 Test vnějších registrů

Funkce **Test_vnej_reg** testuje činnost datových registrů obvodu Xilinx, který je uložen v obvodu Interface (obr. 6.13), pomocí přečtení některého z kontrolních slov, uvedených v tab. 6.7. Poté dojde k porovnání přečtené hodnoty s požadovanou. Při rozporu vrátí hodnotu FAILED.

Svou funkcí Test_vnej_reg kontroluje korektní činnost a připojení obvodu Interface ke V/V zařízení počítače. Indikovaná chyba je ve většině případů způsobena špatným propojením kabelů mezi obvodem a převodním členem laboratorní karty.

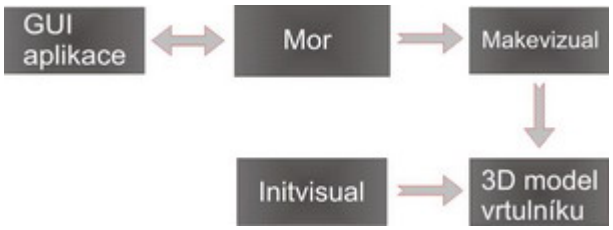
7.4.2 Test přenosových kanálů

Funkce **Test_kanal** testuje činnost kanálů pro sběr dat (oddíl 6.2) pomocí čítačů přenosů z tabulky 6.7. V hierarchii testování je podřízena korektnímu proběhnutí Testu_vnej_reg (při nefunkčnosti Interface je oprávněný předpoklad nefunkčnosti čítačů). Podrobný výklad činnosti naleznete v [1].

Indikovaná chyba bývá tak, jako v předešlém případě, nejčastěji způsobena chybným propojením kanálů. V kanálu č.1 může být chyba navíc způsobena i přerušením zdroje energie napájející PCB No.1.

7.5 Vizualizace virtuálního modelu

Na obr. 7.3 je schematicky znázorněno blokové schéma vizualizace virtuálního modelu, které využívá příkazy a možnosti Vitrual Reality Toolboxu. Vizualizace je spouštěna z GUI aplikace přes funkci mor.



Obr. 7.3 Blokové schéma činnosti vizualizace

Postup vytváření a řízení virtuálního modelu je velmi komplexní a složitý problém, který je podrobně popsán v [1], oddíl 6.2.7. V následujícím textu je uveden pouze stručný popis činnosti vytvořených funkcí.

Funkce **Initvisual** je spuštěna při požadavku na vizualizaci modelu, a jak název napovídá, slouží k inicializaci virtuálního světa.

Funkce **Makevisual** při prvním průchodu otevře prohlížeč virtuálního světa nadefinovaný pomocí předcházející funkce. Dále zprostředkovává funkcím VR Toolboxu údaje o poloze skutečného modelu, ten je následně vykreslen na obrazovku. Při každé změně polohy dochází z důvodu přenosu dat do modelu k volání uvedené funkce, přičemž jeho vykreslování probíhá do již otevřeného okna.

7.6 GUI aplikace

V odstavci bude probrána GUI aplikace z pohledu ovládání vrtulníku. Za tímto účelem je zde uveden rozbor jednotlivých ovládacích prvků a jejich dopad na řízení modelu. Zájemce o popis z hlediska programování odkazuji na [1], oddíl 6.3.

7.6.1 Informace o poloze vrtulníku

Oddíl Sensor reading (obr. 7.4) slouží k zobrazování dat upravených konstruktorem ve funkci mor (data již prošla řetězcem čtení popsaném v oddíle 7.3).

Obr. 7.4 Zobrazování polohy a otáček motoru vrtulníku

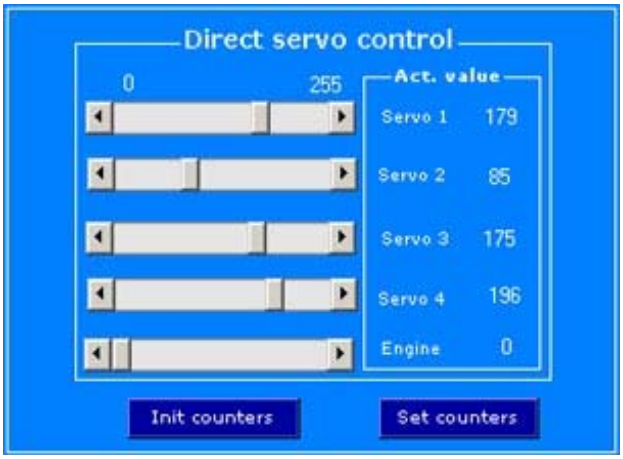
První tři hodnoty z obrázku jsou obrazem registrů IRC snímačů prvního kanálu, další tři jsou obrazem registrů druhého kanálu. Poslední údaj podává informaci o otáčkách motoru. V pravém sloupci naleznete jednotky, ve kterých jsou jednotlivé hodnoty reprezentovány.

Aplikace navíc obsahuje dva řídicí butony Start reading a Stop reading. Význam jednotlivých butonů je zřejmý. Při zapnutí aplikace se automaticky vynuluje historie absolutní polohy uložené v rekonstruktoru.

7.6.2 Ovládání servomechanizmů

Pro manuální nastavování serv a výkonu motoru slouží Direkt servo motor (obr. 6.6). Libovolná hodnota lze nastavit pomocí posuvníků v rozmezí aktivního ovládání (0 až 255 představuje na obr. 6.5 hodnotu 1 - 2ms). V pravém sloupci je zobrazena aktuální nastavená hodnota. Výstup aplikace je přes řídicí funkci předáván na začátek zapisujícího řetězce z oddílu 7.3.

Při prvním spuštění aplikace dojde k automatické inicializaci řídicích čítačů (popis viz 6.1.2) pomocí funkce INITcitače a k přednastavení hodnoty pro všechna serva na 128. Čítač řídicí otáčky je nastaven na nulovou hodnotu proto, aby nedošlo k nechtěnému rozběhu motoru. Buton Init counters slouží k opětovnému spuštění procedury INITcitace. Pomocí Set couters dojde k nastavení defaultní hodnoty čítačů.



Obr. 7.5 Řízení serv a motoru

7.6.3 Diagnostika

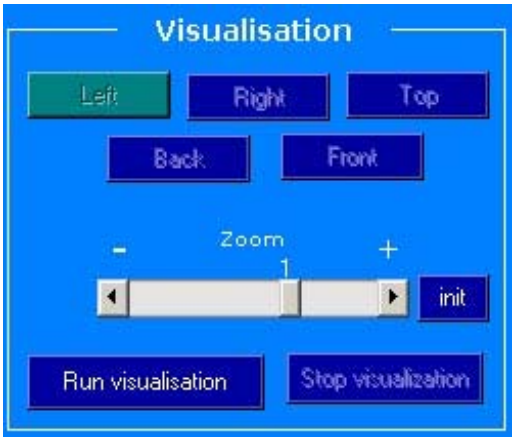
Panel diagnostics (obr. 7.6) je určen pro zobrazení výsledku diagnostických funkcí popsaných v oddíle 7.4. Při prvním spuštění aplikace se dané procedury spouští automaticky. Opětovné proběhnutí testu lze vyvolat tlačítkem Refrech.

Obr. 7.6 Diagnostika

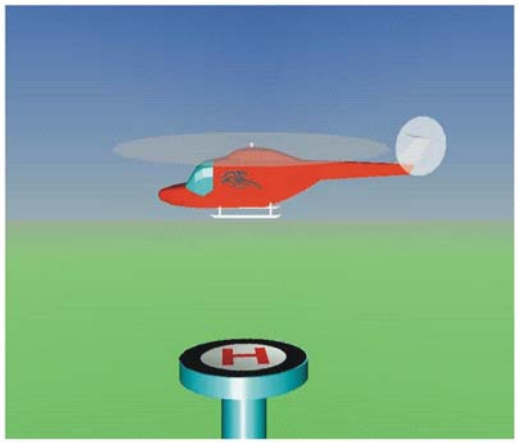
Poznámka: Chyba u kanálu číslo jedna byla pro ukázku správné činnosti diagnostiky způsobena úmyslným rozpojením přenosového kanálu mezi PCB No.1 a vrtulník.

7.6.4 Vizualizace

Oddíl Visualisation (obr. 7.7) slouží k reprezentaci chování vrtulníku pomocí jeho virtuálního 3D modelu (obr. 7.8). Stisknutím tlačítka Run visulation dojde ke spuštění programů popsaných v oddílu 7.5. Pro správnou funkci, jak již bylo řečeno, je potřeba znát polohu modelu. Z této příčiny dojde k automatickému spuštění čtení hodnot polohy, jejíž výstup se zobrazuje do oddílu Sensor reading.



Obr. 7.7 Ovládání vizualizace

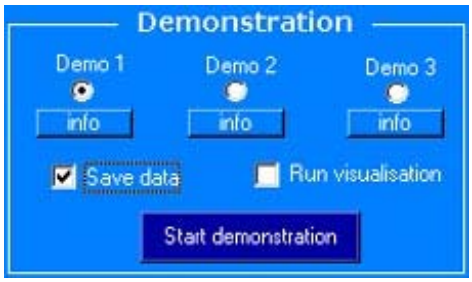


Obr. 7.8 Virtuální 3D model vrtulníku

Horní tlačítka z obr. 7.7 slouží k nastavení perspektivy pohledu na vrtulník (změnu nastavení nemůžeme provádět za běhu vizualizace). Posuvníkem Zoom je umožněno měnit vzdálenost pohledu na model. Původní hodnotu lze vyvolat butonem Init. Tlačítko Stop visualisation slouží k ukončení činnosti popsané aplikace.

7.6.5 Demonstrační mód

Slouží k demonstraci činnosti modelu vrtulníku (obr. 7.9). V současné době je funkční pouze Demo1, které je po spuštění aplikace implicitně nastaveno (popis činnosti ukázky se zobrazí po stisknutí tlačítka info). Ostatní možnosti jsou připraveny pro demonstrační ukázky, které mají být výsledkem navazujících diplomových prací (předmětem má být plná identifikace modelu a vývoj složitých řídicích algoritmů). Vlastní popis demonstrace 1 bude uveden v kapitole 8.

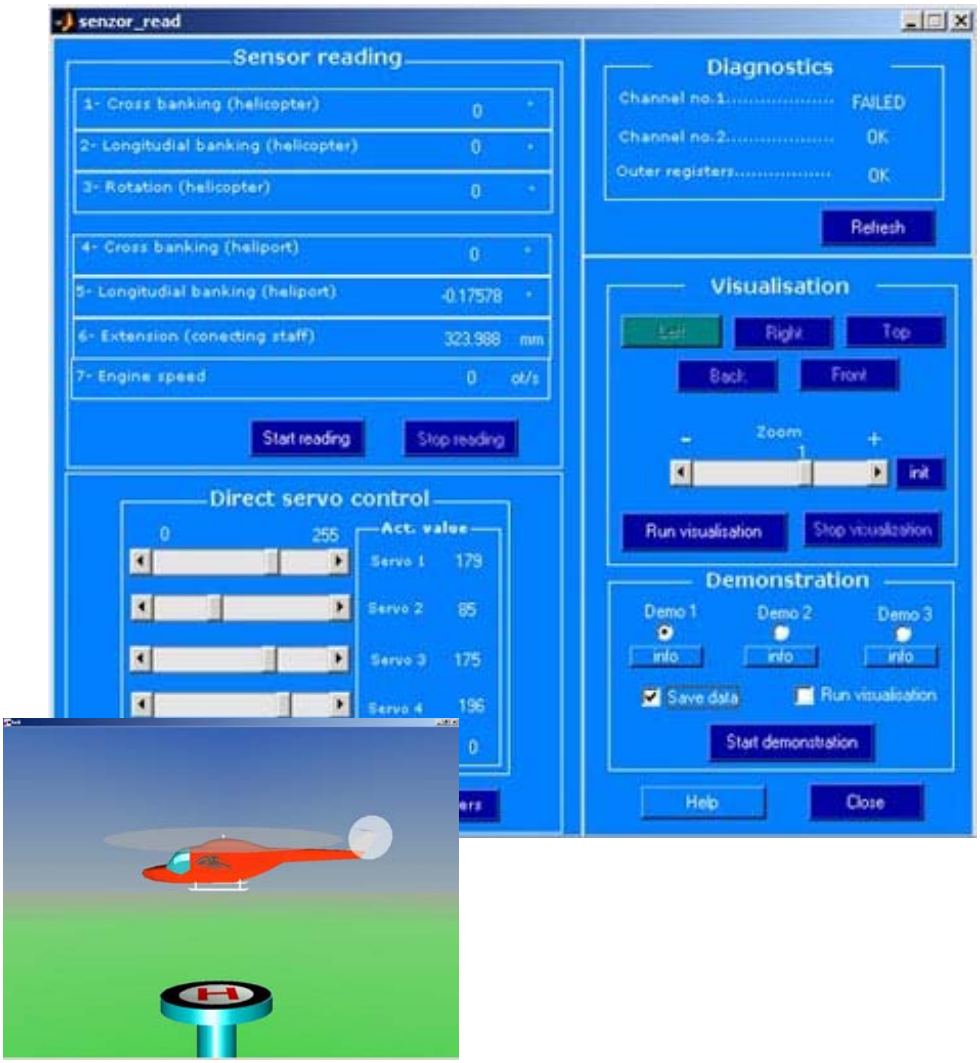


Obr. 7.9 Ovládací panel demonstračních ukázek

Pře spuštěním demonstrace tlačítkem Start demonstration je možné nastavit, zda se mají ukládat data z průběhu letu (zatrženo save data) nebo zda má být spuštěna vizualizace (Run visusualisation). Obě možnosti mohou pracovat současně. Popis formy, ve které se data ukládají, naleznete v [1], odstavec 6.3.1.

V průběhu demonstrace je vyřazena většina ovládacích prvků aplikace, aby jejich nevhodným aktivováním nedošlo k havárii helikoptéry. Výjimkou je tlačítko pro okamžité zastavení demonstrace, které vypne motor a řízení serv.

Na závěr jsem připojil celkový pohled na GUI aplikaci se spuštěnou úlohou vizualizace (obr. 7.10).



Obr. 7.10 Spuštěná GUI aplikace

Poslední butony, které ještě nebyly v předešlém textu zmíněny, jsou tlačítka Help a Cloce. Stiskem tlačítka Help se vyvolá nápověda popisující aplikaci. Tlačítko Close ukončuje její činnost.

8 Ukázka letu a vliv okolí na hardware

Pro ověření funkčnosti a demonstraci možností, které přináší nová řídicí aplikace a upravený model, byla vytvořena jednoduchá letová ukázka. V následujícím textu budou popsány provozní podmínky letové ukázky nutné pro její úspěšné předvedení a uvedeny informace o systému řízení a časování akcí modelu v průběhu letu. Předposlední oddíl se zabývá rušivým vlivem okolí na model. V poslední části jsou uvedeny z důvodu demonstrace stability řízení přechodové charakteristiky systému.

8.1 Provozní podmínky

Před spuštěním letové ukázky (**demo1**) je pro její správný průběh nutné nastavit vrtulník a heliport podle následujících pokynů:

- **Nastavení listů rotoru:** listy nesmějí být plně utaženy a je potřebné jejich nastavení do přímkové konfigurace, jinak může dojít v počáteční fázi startu k jejich kolizi s duralovou trubkou ocasu.
- **Startovací poloha vrtulníku:** umístění vrtulníku na heliportu je vyznačeno pomocí dvou červených pruhů, na něž mají dosednout ližiny podvozku. Bílá šipka označuje orientaci přídě.
- **Umístění heliportu:** heliport je nutno umístit co nejdále od všech větších pevných ploch, aby nedocházelo k zpětným vlnovým rázům, které negativně ovlivňují průběh letu.
- **Redukce stupňů volnosti trenažéru: i**mplementovaná letová ukázka vyžaduje fixaci podélného a příčného náklonu tyče v kloubu č. 2 a podélného a příčného náklonu vrtulníku v kloubu č. 1 u trenažéru (obr. 5.6). Tím systému odebereme 4 stupně volnosti, čímž se úloha řízení mnoharozměrového systému vyššího řádu značně zjednoduší. Fyzicky je tato úprava provedena pomocí hliníkových profilů vložených do jednotlivých kloubů.

Poznámka: Uvedený systém redukce stupňů volnosti je v době předání modelu (červen 2005) součástí heliportu.

8.2 Řízení modelu

Omezením stupňů volnosti trenažéru se úloha řízení původně složitého mnoharozměrového systému, který vrtulník bez fixace trenažéru představuje, značně zjednodušila. Nová konfigurace umožňuje pouze změnu kurzu vrtulníku a jeho kolmý vzlet. V rámci ukázky **demo1** je pomocí digitálního regulátoru řízen kurz vrtulníku, vzlet a změna žádaného kurzu je ovládána předdefinovaným souborem dat.

8.2.1 Použitý regulátor

Jak z kapitoly 2 plyne, pro neměnný kurz vrtulníku musí být splněna momentová rovnováha mezi reakčním moment vyvolaným působením hlavního rotoru a momentem vyrovnávacího rotoru. Při vzrůstajícím vztlaku nosného rotoru, umožňující vzlet modelu, vzrůstá i jeho reakční moment, který musí být vhodně kompenzován vyrovnávacím motorem. K jeho regulaci v demu používáme jednoduchý PID regulátor, který řídí náklon listů zadního rotoru, což způsobuje žádanou změnu momentu.

Obecný diskrétní PID regulátor má tvar:

$$R(z) = r_1 \frac{z-1}{z} + r_0 + r_{-1} \frac{z}{z-1}$$

Vzhledem k tomu, že parametry modelu nebyly dosud identifikovány, jsme konstanty PID regulátoru nastavili podle postupu vedeného v [4] kapitola 4.4 – Empirické metody nastavení konstant regulátoru. Z důvodu omezeného rozsahu natočení listů zadního rotoru (omezená akční veličina) a přítomnosti integrační složky v regulátoru vzniká nežádoucí jev windup. Podle doporučení uvedeného v [4] jsme přistoupili k redukci jeho vlivu omezením integrační složky v centrálním členu regulátoru regulátoru.

Návrh regulátoru probíhal při uměle vyvolaném visení vrtulníku (vrtulník byl vyzdvižen pomocí trenažéru) ve vzduchu, maximálním výkonu motoru a vztlaku hlavního rotoru. V této konfiguraci na vrtulník působí jen velmi malé tření způsobené uchycením k trenažéru. Při startu působí na vrtulník tření mezi ližinovým podvozkem a pryžovou částí přistávací plochy heliportu, což vede ke změně parametrů modelu oproti prvnímu případu. Změnu parametrů způsobuje i již uvedená změna vztlaku rotoru a otáček motoru. Z těchto důvodů je dobré provést startovací fázi co nejrychleji, aby regulátor pracoval ve správné oblasti (navržený regulátor je vůči uvedeným změnám parametrů robustní; při startu dochází pouze k delší době ustálení a k většímu maximálnímu rozkmitu).

Implementace regulátoru umístěného v těle programu mor.m je následující:

Ekminula = Ek;	- ukládání předešlé hodnoty prop. složky
Ek=z-nn(5);	- určení nové proporcionální složky (z = požadovaný kurz)
kd = (Ek - Ekminula);	- určení derivační složky
ki = ki + Ek;	- určení integrační složky
zesileni=0.5;	- konstantní zesílení
windup = 250/zesileni;	- velikost omezení windup
ki=min(max(ki,-windup/konstInt), windup/konstInt);	- výpočet integrační složky
drift=150;	- posunutí zásahu do oblasti pracovního bodu
zasah = zesileni*(Ek + konstInt*ki + konstDr*kd)+drift;	- výpočet zásahu PID regulátoru v okolí

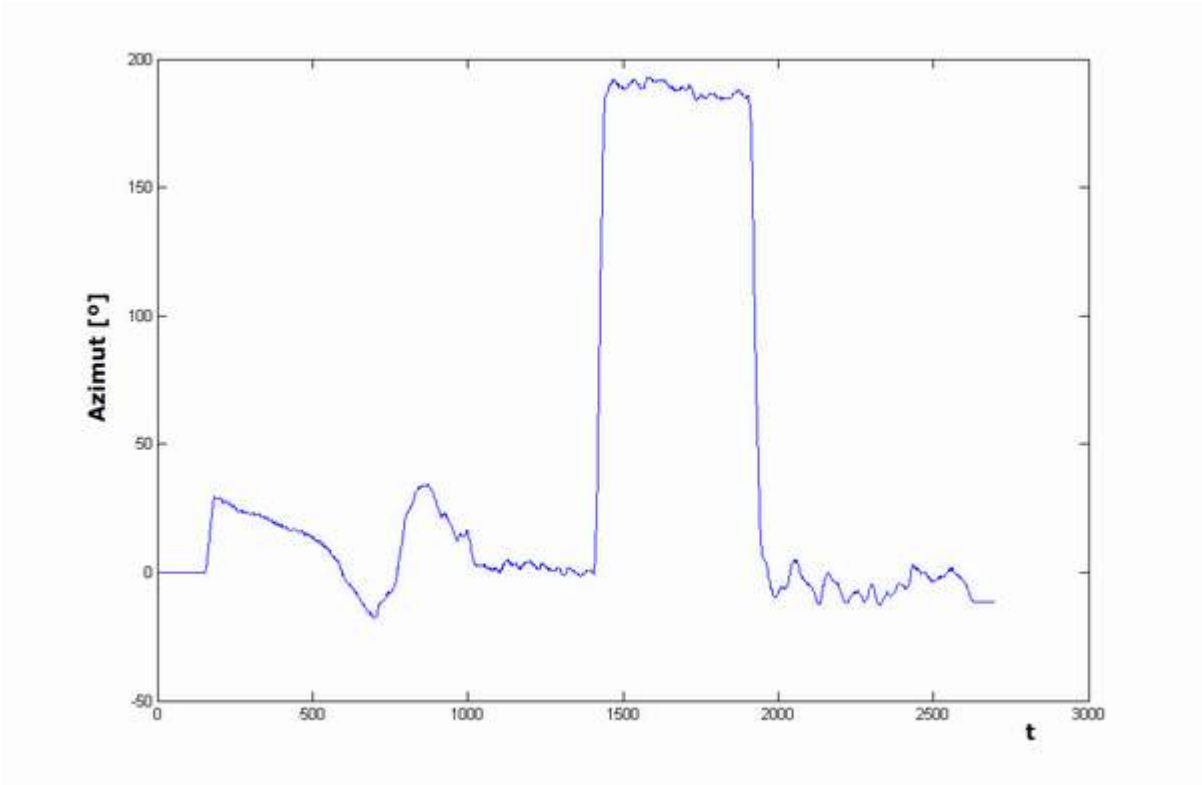
8.2.2 Rozvrh akcí a časování

Letovou ukázku lze rozdělit na sedm časových úseků. V průběhu každého intervalu dochází k přenastavení jednoho z parametrů:

- výkon motoru,
- náklon listů hlavního rotoru,
- žádaná hodnota azimutu vrtulníku.

Změny prvních dvou uvedených parametrů jsou prováděny plynule s proměnným krokem dílků na časovou jednotku. Změna žádané hodnoty probíhá z důvodu ukázky přechodového děje skokem. Po celou dobu demonstrace je regulován zadní rotor helikoptéry popsaným regulátorem. Časovou jednotkou je jeden programový cyklus, což odpovídá 0,031 sec.

Na obrázku 8.1 kde je vyobrazen skutečný průběh azimutu letové ukázky, kde jsou dobře patrné změny výše popisovaných řídicích parametrů. Časový rozvrh akcí popisuje tabulka 8.1.



Obr. 8.1 Průběh azimutu

Čas	Popis	Akce
0 – 200	Příprava na start 1. fáze	Nastavení výkonu motoru na hodnotu 50, za 200 cyklů dojde k odeznění vibrací vrtulníku.
400 – 700	Příprava na start 2. fáze	Zvednutí výkonu motoru na hodnotu 100.
700 – 1000	Start vrtulníku	Zvýšení výkonu motoru na 250, náklon listů hlavního rotoru na maximum (255).
1400 – 1600	První přechodový děj	V čase t = 1400 změna žádané hodnoty z 0º na 180º.
1900 – 2100	Druhý přechodový děj	V čase t = 1900 změna žádané hodnoty z 180º na 0º.
2200 – 2700	Přistání modelu	Snižování výkonu motoru a náklon listů hlavního rotoru na nulovou hodnotu.
> 2700	Závěr ukázky	Vzpnutí motoru, nastavení serv na defaultní hodoty (128).

Tab. 8.1 Časový rozvrh ukázky demo1

8.3 Bezpečnost při provozu

V průběhu letové ukázky je třeba dbát základních bezpečnostních pravidel. Doporučujeme, aby osoba kontrolující průběh demonstrace, byla připravena kdykoliv zastavit letovou ukázku pomocí bezpečnostního tlačítka v aplikaci GUI. Tím se vypne motor a vrtulník může přistát autorotací. Dále je vhodná dobrá dostupnost vypínače hlavního zdroje napájení vrtulníku pro případ, že by nebylo možno vypnout motor pomocí aplikace (s touto situací jsme se dosud nesetkali).

8.4 Parazitní vliv okolí

Při provozu modelu v laboratoři působí na model celá řada vnějších zdrojů rušení, které větší či menší měrou ovlivňují jeho bezproblémový provoz. Rušení můžeme rozdělit podle způsobených chyb na dvě skupiny, které jsou popsané v prvních dvou odstavcích. V dalším textu naleznete zjištěné zdroje rušení a praktické zkušenosti.

8.4.1 Rušení povelového řízení

Rušení povelového řízení nevětší měrou ovlivňuje činnost bezdrátového datového spoje realizovaného RC soupravou. To způsobuje výpadky v řízení modelu, což se projevuje jeho kolísavým výkonem motoru a cukáním řídicích serv. Ve výjimečném případě dochází až k výpadku obvodu Xilinx (tato možnost se v našem případě stala pouze jednou).

Vzhledem k charakteru přenosové cesty je jedinou ochranou proti rušení omezit jeho zdroje popsané v oddílu 8.4.3.

8.4.2 Rušení sběru dat

Z praktických zkušeností jsme zjistily, že k největšímu rušení přenosové cesty pro sběr dat dochází v místě spojení obvodu Interface s převodním členem V/V karty (propojení je realizováno pomocí dvacetikilových kabelů). Na uvedeném spoji nedochází pouze k rušení vlivem vnějších zdrojů uvedených v 8.4.3, ale i k vzájemným přeslechům mezi vodiči v kabelu. To způsobuje, že při čtení dat z Interface jsou přečteny jiné hodnoty než ty, které tam byly poslány (při zpracování vznikají chyby v interpretaci polohy).

Rušení se nám podařilo omezit zkrácením propojovacích kabelů, čímž počet chybných přenosů rapidně klesl. Navíc jsme přistoupili i k softwarové filtraci přijatých dat pomocí klouzavého průměru (viz odstavec 7.3.5).

Při návrhu sofistikovaných regulačních algoritmů doporučuji rekonstruovat polohu z čidel pomocí Kalmanova filtru. Při přetrvávání problému by bylo vhodné realizovat spoj pomocí stíněných kabelů.

8.4.3 Zdroje rušení

Za nejzávažnější zdroje rušení můžeme po praktických zkušenostech označit mobilní telefony, některé zdroje počítačů v budově školy a jiné vysílače v modelářském pásmu.

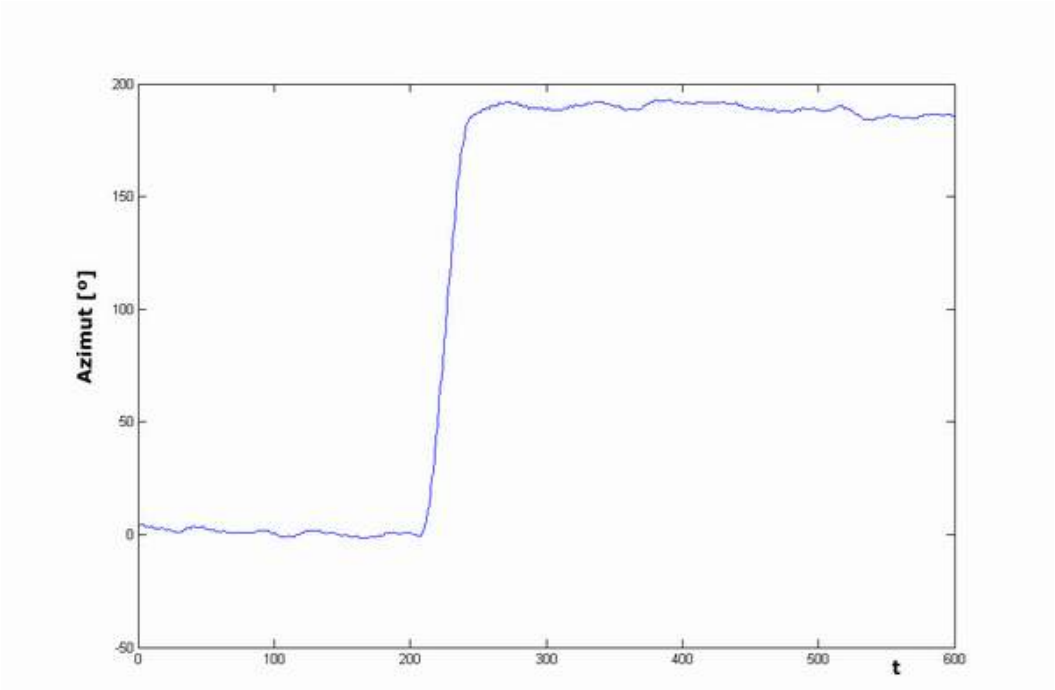
Všechny uvedené zdroje je dobré pro hladký průběh ukázky činnosti potřeba co nejvíce omezit, zvláště mobilní telefony!!!

8.4.3 Praktické zkušenosti

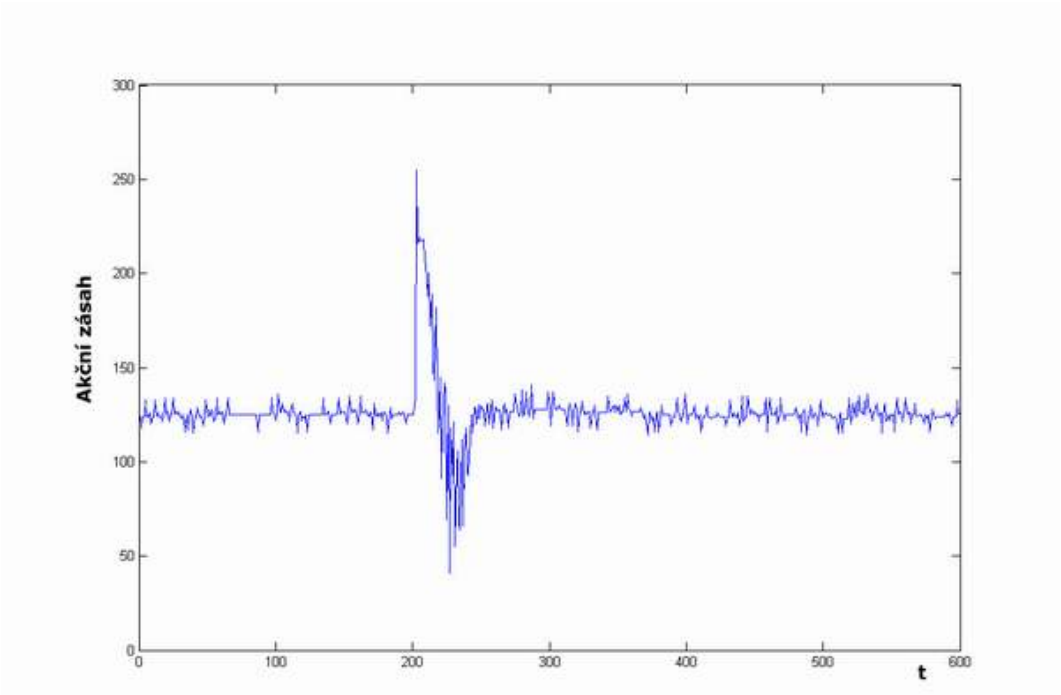
Popsaný parazitní vliv okolí měl při testování modelu značně proměnlivý průběh. Byly vyučovací hodiny, kdy se chyby vzniklé rušením neobjevovaly a byly hodiny, kdy byly chyby natolik časté, že znemožňovaly práci na modelu (případ se objevil maximálně dvakrát do měsíce). Při těchto problémech většinou stačilo počkat na další hodinu. V zásadě nejlepší den na testování je páteční odpoledne a víkend kdy je škola relativně prázdná. Tuto skutečnost si vysvětlujeme nejmenším počtem zdrojů rušení (8.4.3).

8.5 Přechodové charakteristiky

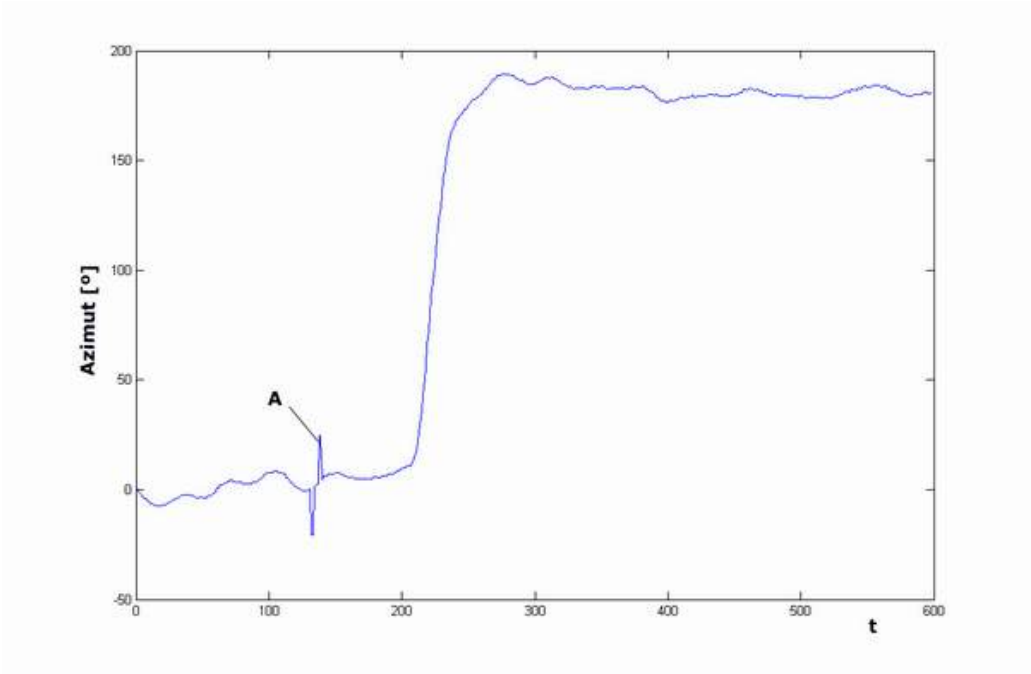
Obrázky 8.2 a 8.4 zachycují přechodovou charakteristiku systému jako odezvu na změnu žádané hodnoty z 0º na 180º v čase t = 200 a vypočtené regulační zásahy PID regulátoru (obr. 8.3 a 8.5). První dva uvedené průběhy nejsou ovlivněny rušením. Poslední dva obrázky zachycují typické chování systému při rušení (chybná hodnota vlivem rušení je označena písmenem A).



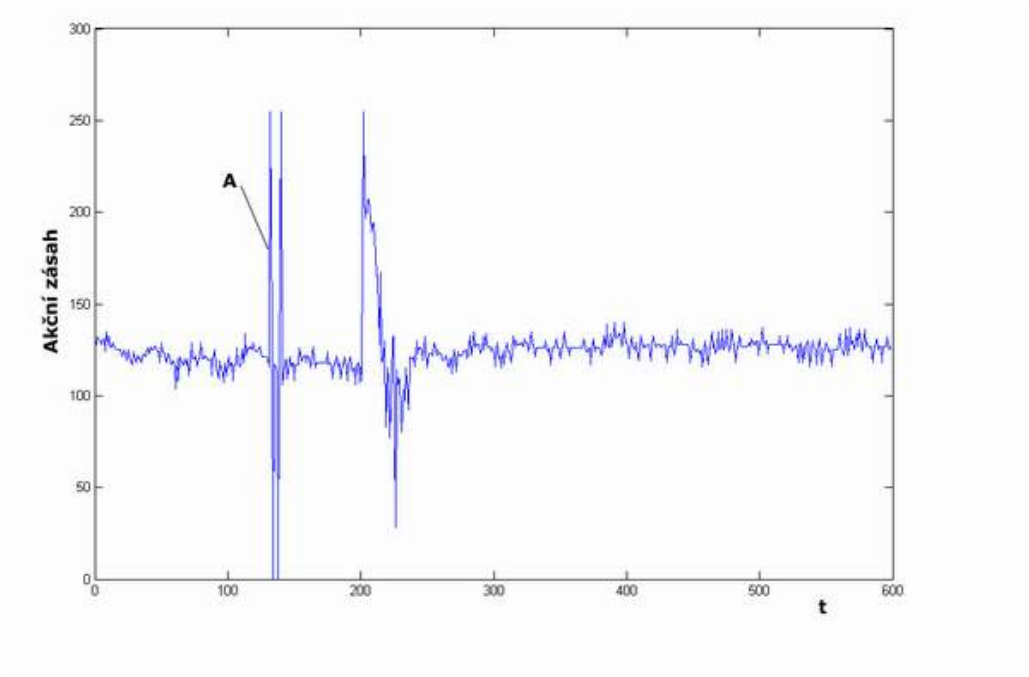
Obr. 8.2 Přechodová charakteristika bez vlivu rušení



Obr. 8.3 Regulační zásah bez vlivu rušení



Obr. 8.4 Přechodová charakteristika při rušení



Obr. 8.5 Regulační zásah ovlivněný rušením

9 Závěr

Jak jsem již na začátku předeslal, mým cílem bylo zjistit příčiny nefunkčnosti modelu helikoptéry, pokusit se uvést model do provozuschopného stavu a upravit systém umožňující řízení modelu z počítače. Již od počátku mé práce jsem věděl, že stojím před nelehkým úkolem, ale pevně jsem věřil ve zdárný úspěch.

Při rozboru hardwaru jsem narazil na mnoho problémů, které musely být odstraněny. Mezi hlavní překážky patřily nefunkční desky plošných spojů umístěné na vrtulníku. Po bližší analýze jsem s lítostí musel přistoupit k jejich vyřazení a k následné náhradě, přičemž jsem dodržel koncepci založenou na velkokapacitních programovatelných logických polí Xilinx. Popsanou výměnou a provedením dalších menších úprav jsem dospěl k uspokojivé a spolehlivé funkčnosti systému.

Z hardwarového pohledu model v současné době umožňuje spolehlivý přenos dat do počítače, kde proběhne jejich zpracování a vyhodnocení, na základě čehož vrtulník reaguje na pokyn povelového řízení. Systém je tím připraven pro budoucí implementaci řídicích algoritmů a otevírá tak cestu dalšímu vývoji, což může být tématem navazujících diplomových prací.

Vzhledem k provázanosti řešených úkolů jsem po dokončení úprav na hardwarové části, která musela předcházet, vypomáhal na vývoji softwaru, a to zejména na demonstrační ukázce, která nastiňuje současné letové možnosti a řízení vrtulníku.

Svého úkolu jsem se zhostil, jak nejlépe jsem dovedl, dle svého nejlepšího svědomí i vědomí. V průběhu práce jsem si uvědomil součin mezi nabytými teoretickými vědomostmi a jejich uplatněním v praxi, neboť jeden bez druhého nemohou samostatně existovat.

Všem těm, které tento model také osloví a budou pokračovat na jeho vývoji, bych chtěl popřát hodně úspěchů a doufám, že předložený text jim bude nápomocen a poskytne jim ucelený přehled o stavu modelu.

10 Reference

[1] Bury H.: Úpravy modelu helikoptéry. Diplomová práce ČVUT FEL, Praha 2005.

[2] Kocourek P. Přenos informace. Skriptum ČVUT FEL, Praha 2001.

[3] Horáček P. Systémy a modely. Skriptum ČVUT FEL, Praha 2000.

[4] John J. Systémy a řízení. Skriptum ČVUT FEL, Praha 1999.

[5] Krsek P. Řídící systém modelu helikoptéry. Diplomová práce ČVUT FEL, Praha 1995.

[6] Fojtík J. Programový systém rychlé komunikace pro model helikoptéry. Diplomová práce ČVUT FEL, Praha 1995.

[7] Beneš P. Řízení helikoptéry. Diplomová práce ČVUT FEL, Praha 1993.

[8] GM Eletronic, s. r. o.: Součástky pro elektroniku. Katalog, Praha 2004.

[9] Advantech Co. Ltd [online].
<http://www.advantech.com>.

[10] Humusoft: Realtime Toolbox for use with Matlab User's manual. Version 3.0, 1999.

[11] The MathWorks [online].
<http://www.mathworks.com>.

[12] GES Electronics [online].
<http://www.ges.cz>.

[13] Asix [online].
<http://www.asix.cz>.

[14] Weiss, O. Katalog tesla [online].
<http://web.telecom.cz/oweisz/katalog.htm>.

[15] Popis programovatelných čítačů.
<http://dt.fme.vutbr.cz/~measure/C8254.htm>.

Příloha A Čítač 8253

Obvod 8254 je programovatelný čítač/časovač, který obsahuje tři samostatně pracující čítače. Každý čítač je 16bitový s předvolbou, synchronní, dekrementující, tj. čítající od předvolby směrem dolů buď binárně, nebo dekadicky (při binárním čítání může čítat v rozmezí od 65535 do 0). Uživatel může čítač ovládat jak hardwarovou, tak softwarovou cestou.

A.1 Hardwarový přístup

Každý čítač můžeme ovládat pomocí tří vývodů TTL úrovně:

- **Vstup CLK**: umožňuje zmenšit o jedničku (dekrementovat) hodnotu čítače. Odečtení nastane při přechodu signálu CLK z log1 na log0. Obdélníkový signál na CLK se nazývá hodinový.
- **Hradlovací vstup GATE:** umožňuje blokovat dekrementování čítače signálem CLK. Čítač počítá (nebo přesněji řečeno odčítá) jen je-li signál GATE na log1. Je-li GATE na log0 čítač na změnu signálu CLK nereaguje.
- **Výstupní signál OUT**: přechodem z log1 na 0 signalizuje dosažený stav čítače (například přetečení). Jeho časový průběh závisí na naprogramovaném režimu.

A.2 Softwarový přístup

Softwarový přístup k čítačům je umožněn pomocí vstupních a výstupních registrů trojího typu:

- **Registr CWR**: jde o takzvaný řídicí registr. Do registru je možné pouze zapisovat. Zápisem řídicího slova se čítače nastaví na požadovanou funkci.
- **Registr OL:** registr OL průběžně sleduje obsah čítače. Fyzicky se skládá ze dvou 8bitových registrů OLM (obsahuje horních 8 bitů) a OLL (obsahuje 8 dolních bitů). Po odeslání příkazu čtení do řídicího registru CWR se do registrů OLM a OLL zachytí okamžitá hodnota čítače a tato hodnota se tam podrží, dokud ji nepřečteme. Pak se OL opět vrátí k průběžném sledování obsahu čítače. Tímto způsobem je možno vzorkovat hodnotu v čítačích za chodu.
- **Registr CR:** registr slouží k nastavování hodnot, od kterých jednotlivé čítače čítají. Tak jako v předešlém případě je registr rozdělen na dva 8bitové registry CRM (8 horních bitů) a CRL (8 dolních bitů). Při zápisu předvolby do čítače se nastavovaná hodnota nejprve zapíše do CRM a CRL registrů, a teprve poté do vlastního čítače. Pokud dojde k zápisu nové předvolby v době, kdy čítač pracuje, dokončí čítač čítání podle staré předvolby, a pak je teprve přenesena do čítače nová hodnota. Při každém zápisu do řídicího registru CWR se registr CR nuluje.

Jak bude vysvětleno v následujícím textu, každý z časovačů může pracovat jak v 16bitovém nebo 8bitovém módu. Jestliže čítače počítají s 16bitovou přesností je samozřejmě nutné údaje číst/zapisovat nadvakrát. Nejprve přečteme (zapíšeme) nižší byte (slabiku), pak vyšší byte (slabiku).

A.3 Nastavení čítačů

Jak již bylo řečeno programovaní čítačů se provádí pomocí zápisu řídicího slova do řídicích registrů. V tabulce A1 je popsán význam jednotlivých bitů řídicího slova.

	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Význam bitů	SC1	SC0	RW1	RW2	M2	M1	M0	BCD
Funkce bitů	Adresa čítačů		Způsob zápisu		Nastavení módu			Číselná soustava

Tab. A1 Formát řídicího slova

Pomocí bitů SC1 a SC2 nastavujeme čítač, pro který je řídicí slovo určeno (tab. A2). Bity RW1 a RW2 určují způsob zápisu, respektive čtení, z registrů OL/CR (tab. A3).

SC1	SC0	Význam
0	0	Čítač 0
0	1	Čítač 1
1	0	Čítač 2
1	1	Nevyužito

Tab. A2 Volba čítače

RW1	RW2	Význam
0	0	Operace s registrem OL
0	1	Čtení / zápis jen nižšího bytu (LSB)
1	0	Čtení / zápis jen vyššího bytu (MSB)
1	1	Čtení / zápis dvou bytů napřed LSB, pak MSB

Tab. A3 Zápis a čtení

Bity M2, M1, M0 nastavujeme jeden z šesti režimů, ve kterých můžou čítače pracovat (tab. A4).

M2	M1	M0	Mód
0	0	0	0
0	0	1	1
x	1	0	2
x	1	1	3
1	0	0	4
1	1	0	5

Tab. A4 Nastavení módů

Posledním bitem BCD volíme číselnou soustavu (tab. A5).

BCD	Význam
0	Binární čítač
1	Dekadický čítač

Tab. A5 Volba číselné soustavy

Význam jednotlivých módů je následující:

- **Mód 0** – generování přerušení s programovým spouštěním:

  V modu 0 čítač odpočítává hodinové pulzy od počáteční hodnoty směrem k nule po programovém nastavení a uvolnění signálu GATE (přechod na log1). Čítač pokračuje v odpočítávání i po překročení 0 (dojde k přetečení čítače). Pokud se během počítání nastaví nová počáteční hodnota, počítání se zastaví a výstup OUT přejde na log0. Čítač pak začne odpočítávat od nové hodnoty.

- **Mód 1 –** generování přerušení s hardwarovým spouštěním (programovatelný monostabilní klopný obvod):

  Odpočítávání hodinových impulzů od počáteční hodnoty směrem k nule inicializuje každá náběžná (přechod z 0 na 1) hrana hradlovacího signálu GATE, která zároveň vynuluje výstup OUT. Po dosažení 0 přechází výstup OUT do úrovně log1 a nové počítání odstartuje další náběžná hrana signálu GATE.

- **Mód 2** – generátor impulzů s automatickým spouštěním:

  Po vložení počáteční hodnoty začne čítač opakovaně odpočítávat nastavený počítaný interval a generovat impulzy (přechod výstupu OUT z log1 na 0) trvající právě jeden hodinový interval během doby, kdy je v čítači hodnota 1. Po dekrementaci čítače na nulu se počáteční hodnota automaticky nastaví na původní hodnotu. Pokud se během počítání zapíše do čítače jiná hodnota, neovlivní to právě probíhající cyklus. Následující cyklus bude již s novu hodnotou. Nulová hodnota na vstupu GATE zastavuje odčítání.

- **Mód 3** – generátor obdélníkového signálu:

  Po vložení počáteční hodnoty začne čítač generovat (na výstupu OUT) obdélníkový signál se střídou 1:1. Výstup OUT se na začátku každého počítacího intervalu nastaví na log1 a v půlce počítacího cyklu přechází na log0 (je-li počáteční hodnota liché číslo, je jednotkový výstup o 1 hodinový cyklus delší). Pokud se během počítaní vloží do čítače nová hodnota, ovlivní to až následují počítací cyklus. Hradlovací výstup GATE zastavuje počítání a při jeho náběžné hraně se čítač rozběhne od počáteční hodnoty.

- **Mód 4** – generátor impulzů s programovým spuštěním:

  Čítač odpočítává hodinové impulzy od počáteční hodnoty směrem k nule po programovém nastavení a přechodu GATE na log1. Při nulovém stavu čítače přejde výstup OUT na jeden hodinový cyklus do log0. Čítač pokračuje v počítání, ale výstup OUT zůstává na log1 až do dalšího nastavení a dopočítání čítače. Pokud se během počítaní vloží nová počáteční hodnota, neovlivní to probíhající cyklus, ale hned po dosažení nuly začne nový cyklus s novou počáteční hodnotou.

- **Mód 5** – generátor impulzů s hardwarovým spouštěním:

  Odpočítávání hodinových impulzů inicializuje každá náběžná hrana signálu GATE. Výstup OUT nabývá hodnoty log0 při nulovém stavu čítače na dobu jednoho hodinového intervalu. Pokud se během čítání zapíše nová počáteční hodnota neovlivní to právě probíhající cyklus, ale až následující, který začne vždy při příchodu náběžné hrany signálu GATE.

A.4 Operace čtení/zápis

Zápis čísla do čítače:

Po každém naprogramování čítače řídicím slovem je nutno do příslušného registru čítače zapsat počáteční hodnotu, od které se bude odečítat. Každý registr má svoji adresu a na tuto adresu se zapíše požadované číslo. V tabulce A6 je ukázka řídicího slova, které nastavuje jednotlivé čítače do 16 bitového binárního režimu, kdy první čítač bude pracovat v módu 1, druhý v módu 2 a třetí v módu 3.

	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
Význam bitů	SC1	SC0	RW1	RW2	M2	M1	M0	BCD	Čítač
Hodnota	0	0	1	1	0	0	1	0	1
	0	1	1	1	0	X	1	0	2
	1	0	1	1	x	1	1	0	3

Tab. A6 Ukázka řídicího slova pro nastavení módů

Čtení hodnoty:

U čítačů existují dva způsoby čtení obsahu, a to čtení hodnot ze zastavených čítačů a čtení hodnot za chodu bez zásahu do operace čítání s využitím registru OL. U prvního způsobu čtení je nutné čítač zastavit pomocí hradla GATE. Načítaná hodnota se automaticky přenese do registru OL, a pak si ho přečteme z adresy příslušného čítače. U druhého způsobu se postupuje tak, že do řídicího registru CWR se zapíše povel podle tab. A6. Obsah čítače se zachytí do registru OL. Nezávislost čítačů umožňuje vyslat i více těchto příkazů s tím, že se OL čte později. Chybné je však vysílat další povely do téhož čítače bez předchozího čtení OL.

	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
Význam bitů	SC1	SC0	RW1	RW2	M2	M1	M0	BCD	Čítač
Hodnota	0	0	0	0	x	X	x	x	1
	0	1	0	0	x	X	x	x	2
	1	0	0	0	x	X	x	x	3

Tab. A7 Řídicí slovo pro čtení čítačů za chodu

Poznámka: Zcela nepřípustné je posílat do čítače řídicí slovo mezi čtením dvou slabik téhož OL.

Příloha B Obvody Xilinx

Z důvodů velké obvodové náročnosti systému sběru a zpracování dat, bylo rozhodnuto o použití velkokapacitních programovatelných polí Xilinx. Kapitola přináší základní informaci o obvodech Xilinx jak z obecného pohledu, tak z pohledu použitých logických polí.

B.1 Logické pole Xilinx

Obvody Xilinx jsou programovatelná logická pole s velkou hustotou integrace. Každý obvod se navenek chová jako hradlové pole obsahující několik tisíc hradel. Pro systém sběru dat byla vybrána PLP z rodiny XC3000. Z pohledu doby vzniku systému, datovaném rokem 1994, patřila tato série logických polí mezi moderní. V dnešní době se tato řada přestala vyrábět, což limituje další práce na instalovaných polích.

Základní stavební jednotkou logického pole řady XC3000 je konfigurační logický blok (CLB). V něm je realizována logická funkce definovaná tabulkou. Součástí každého bloku jsou dva klopné obvody a propojky, které mohou propojit výstupy se vstupy v rámci jednoho bloku (zpětná vazba z výstupu na vstup). Každý obvod má globální signál reset, který vynuluje interní klopné obvody. Časování je zajištěno širokou škálou typů a zdrojů hodinového signálu. CLB bloky jsou sestaveny do čtvercové matice o rozměrech 8 x 8 až 22 x 22 (platí pro řadu XC 3000).

Řada XC3000 je osazována do pouzder s min. 64 vývody a větších. Pro zavedení externích vstupů a výstupů do pouzdra je možné použít, vyjma vyhrazených pinů z tab. B2, všechny vývody. Každý vývod je opatřen vstupně/výstupním blokem (IOB = input output block). Vstup a výstup může být veden přes klopný, nebo přes třístavový obvod. Díky tomu jeden pin pouzdra může realizovat vstup a výstup zároveň (obousměrná třístavová sběrnice). U výstupního členu je možné také přímé propojení. Vstupně/výstupní blok neumožňuje realizovat žádnou logickou funkci, s výjimkou invertování některých signálů. IOB obklopují dokola matici CLB. Vstupní a výstupní signály jsou volitelné jak v úrovních logiky TTL, tak i logiky CMOS (obvod vyžaduje 5V napájení).

Propojení mezi bloky zajišťují vodiče a propojovací pole v mezerách mezi jednotlivými bloky. Navíc zde existují speciální dlouhé spoje (LL = long lines), kde vertikální LL slouží pro rozvod řídicích signálů (hodinové signály a signály reset). Vertikální LL jsou opatřeny horizontálními spojkami, tak mohou jednoduše vytvořit rozvod po celém obvodu. Svou architekturou obklopují jednotlivá pole CLB tak, že každý blok má přístup ke dvěma horizontálním LL přes třístavové oddělovače (z důvodu předpokládaného sdílení LL více zdroji). Každá LL pracuje tak, že si do přepsání pamatuje poslední vloženou hodnotu.

Časování jednotlivých obvodů v PLP Xilinx bývá odvozeno od vnější časové základny. Nejčastěji se v praxi využívá možnosti připojení krystalového oscilátoru k příslušným vývodům (tab. B2).

B.2 Nahrávání konfigurace

Konfigurační data PLP řady XC3000 jsou uchovávány ve vnějším zdroji. Po přiložení napájecího napětí se obvod snaží do své vnitřní paměti (CMOS-SRAM) nahrát konfigurační program. Ten může být uložen v sériové nebo v paralelní paměti, nebo ho může poskytovat jiný zdroj dat (např.PC). Je možné, aby byl přenos konfiguračních dat řízen buď obvodem Xilinx, nebo zdrojem konfiguračních dat. Jaký zdroj a způsob přenosu bude použit, lze nastavit konfigurací řídicích pinů, které musí být nastaveny před začátkem nahrávání. V tab. B1 jsou popsány jednotlivé módy spolu s nastavením řídicích vstupů.

Mód	M2	M1	M0	Popis
Slave	1	1	1	Sériový zápis s externím řízením je užíván pro nahrání z počítače, či při kaskádovém zapojení více obvodů.
Master – seriál	0	0	0	Sériový zápis, při němž sběrnici řídí sám obvod Xilinx, je používán pro čtení ze sériové konfigurační paměti PROM.
Peripheral	1	0	1	Paralerní zápis s externím řízení pro zápis z počítače.
Master – parallel	1	1	0	Paralelní čtení konfigurace z běžných pamětí EPROM řízené obvodem Xilinx. Čte od horních adres.
Master – parallel	1	0	0	Paralelní čtení konfigurace z běžných pamětí EPROM řízené obvodem Silic. Čte od spodních adres.

Tab. B1 Módy konfigurace obvodu Xilinx

Poznámka: Při použití paralaxního nahrávání v případě řady XC3000 přináší navzdory očekávání zpomalení počáteční Inicializace. Obvod si totiž musí paralelní data interně překódovat na sériová. Navíc sériový přenos umožňuje nahrávání více obvodů spojených do kaskády z jednoho zdroje dat.

B.3 Programování

Vlastní programovatelná logická pole vyžadují konfigurační data v binární podobě, kde jednotlivé bity odpovídají přímo propojkám v obvodu. Návrh složitých obvodů v takové reprezentaci je z programátorského hlediska nevhodný, proto firma Xilinx ke svým výrobkům dodává vývojový balíček. Ten se, ve většině případů, skládá z knihovny obvodů do vývojových programů (jako např. Orcad, Eagle) a z programů realizujících automatický návrh a umístění schématu do vnitřní logiky. Schéma vnitřního zapojení se namaluje v příslušném programu z dodané knihovny a výstupní soubor se poté jako zdrojový použije v přiložených optimalizačních programech.

Poznámka: V současné době na fakultě neexistuje vývojový systém pro programování logických polí Xilinx, tudíž jsme se s programováním nemohli blíže seznámit. Pokud by vyvstal požadavek na změnu struktury u realizovaného systému sběru dat bude nutné jeho obstarání, které však bude velmi obtížné. Jak již bylo zmíněno, použitá řada XC3000 se již v dnešní době nevyrábí. Z tohoto důvodu není požadovaný vývojový systém ani v oficiální nabídce prodejců. Navíc u staršího balíčku nebude zajištěna kompatibilita se současnými verzemi vývojových programů.

B.4 Použité obvody

Pro účely zpracování dat, jejich přenosu a spojení s počítačem, jsou použity tři obvody Xilinx uložené v pouzdru PLC84C. Dva obvody jsou typu XC 3042C a jeden typu XC 3042A. Dané obvody mají matici CLB bloků o velikosti 12 x 12. Mezi uvedenými typy je rozdíl v mezním zpracovatelném kmitočtu. Jejich zapojení a další parametry se neliší. Z důvodu, že oba mezní kmitočty jsou vyšší než je potřeba (130MHz u verze A a 70MHz u základní verze), jsou tyto obvody z pohledu sběru a řízení dat záměnné.

Jako zdroj konfiguračních dat je pro obvody XC3042 použita sériová konfigurační paměť XC1736DPD8C s obsahem 36288 bitů v pouzdru DIP8. Paměť je součástí obou desek PCB a desky Interface.

B.5 Základní zapojení

Požadavky na zapojení jsou součástí tab. B2.

Funkce	Vývod Xilinx	Vývod Paměť	Režim master připojen na:	Režim slave připojen na:
GND	1, 43	2	0V	0V
VCC	22, 64	1	+ 5V	+ 5V
PWRDWN	12	-------	Přes 27kΩ na VCC	Přes 27kΩ na VCC
M0	32	-------	GND	VCC
M1	31	-------	GND	VCC
M2	33	-------	Přes 5kΩ na GND	Přes 5kΩ na GND
HDC	34	-------	NC	NC
LDC	36	-------	NC	NC
INIT	42	-------	NC	NC
DIN	72	6	----------	----------
CCLK	74	4	----------	----------
DONE	55	5	Přes 27kΩ na VCC	Přes 27kΩ na VCC
RESET	54	-------	Přes 27kΩ na VCC	Přes 27kΩ na VCC
DOUT	73	-------	NC	NC
XTAL1	57	-------	Externí krystal 18,432 MHz	
XTAL2	53	-------		

Tab. B2 Zapojení obvodů Xilinx

Napájecí napětí pro obvody XC3042 a konfigurační paměti je 5V. Vstupy a výstupy jsou očekávány v TTL úrovních. Vstupy mají automaticky opravované úrovně pomocí Schmidtových KO. Pro obsluhu jsou součástí desek dvě tlačítka. Tlačítko pro reset obvodu (má dlouhý dřík hmatníku) a tlačítko pro nahrávání programu (po každém resetu obvodu je potřeba program nahrát znovu).

Příloha C Obsah přiloženého CD

CD obsahuje následující dokumentaci k projektu:

- **Eagle**: adresář obsahuje použitá obvodová schémata, včetně programu Eagle.
- **Fotodokumentace**: obrázky vrtulníku a dalších periferií.
- **Program**: programové soubory řídicí aplikace pro prostředí Matlab.
- **Text**: textová podoba této diplomové práce a související práce [1].
- **Video**: záznam z demonstrační ukázky letu.