

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VZDUCHOLOŽ – DYNAMICKÝ MODEL



Katedra řídicí techniky

Praha, 2009

Autor: Marek Vondra

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V praze dne

podpis

Poděkování

Především děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Doc. Ing. Jiřímu Bayerovi, CSc. za ochotu, cenné rady a podněty. Za cenné praktické rady děkuji Bc. Jiřímu Kubiasovi a za teoretické podněty Doc. Ing. Bohuslavu Kirchmanovi, CSc. V neposlední řadě patří můj dík rodičům, kamarádům a všem, kteří mně po celou dobu studia podporovali.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá porovnáním matematicky odvozeného a experimentálně určeného modelu, také se zabývá výběrem vhodného regulátoru s ohledem na dynamické vlastnosti vzducholodě. Podrobně je vysvětlen výběr a návrh regulátoru. Tento regulátor byl navržen pro dva nezávislé režimy řízení. Pro ruční ovládání, kdy je model ovládán přes bluetooth pomocí ovládacího prvku a pro autonomní řízení, které probíhá bez potřeby zásahu obsluhy.

Klíčová slova

vzducholod', nelineární řízení, suboptimální řízení, trajektorie optimálního brzdění, fázová rovina

Abstract

This bachelor's thesis deals comparing of mathematical transfer of a model and experimental transfer of the model. The bachelor's thesis was chosen the best regulator for controlling the airship. A design and a choice of the regulator was written in all detail. The regulator was designed for two independent mode of controlling of the model. Controlling by the help of joystick or controlling without person driving

Keywords

airship, nonlinear controlling, phase

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Marek Vondra**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Vzducholod' - dynamický model**

Pokyny pro vypracování:

1. Porovnejte teoreticky odvozený model vzducholodi s experimentálně zjištěným dynamickým modelem stanoveným (Matlab) z naměřených reálných dat.
2. Navrhněte optimální řízení pohybu vzducholodě zejména s ohledem na dynamické vlastnosti jejího pohybu v uzavřeném prostoru (místnost).
3. Navrhněte jednoduchý způsob stanovení polohy vzducholodě při jejím pohybu po předem stanovené dráze.

Seznam odborné literatury:

DP Müller, Bittner 2008

Vedoucí: Doc.Ing. Jiří Bayer, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2009/10

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry



12.
doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 7. 4. 2009

Obsah

KAPITOLA 1	ÚVOD	1
KAPITOLA 2	POPIS MODELU	2
2.1	PALUBNÍ ŘÍDÍCÍ SYSTÉM.....	3
2.2	KOMPAS	3
2.3	INERCIÁLNÍ JEDNOTKA.....	4
2.4	ULTRAZVUKOVÉ DÁLKOMĚRY	4
2.5	REGULÁTOR PRO ŘÍZENÍ OTÁČEK ELEKTROMOTORŮ	5
KAPITOLA 3	POROVNÁNÍ MODELU	6
3.1	TEORETICKÝ MODEL	6
3.1.1	<i>Otáčení kolem osy Z</i>	<i>6</i>
3.1.2	<i>Pohyb v rovině XZ</i>	<i>6</i>
3.2	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ MATEMATICKÉHO MODELU	6
3.2.1	<i>Měření azimutu</i>	<i>6</i>
3.2.1.1	Identifikace přenosu azimutu	7
3.2.1.2	Porovnání přenosů pro azimut	8
3.2.2	<i>Měření pohybu v rovině XZ.....</i>	<i>9</i>
3.2.2.1	Měření pohybu ve směru X	9
3.2.2.2	Výškový model.....	11
KAPITOLA 4	AUTONOMNÍ ŘÍZENÍ MODELU	12
4.1	PÁSMOVÝ PŘEPÍNAČ.....	14
4.1.1	<i>Pásmový přepínač polohy.....</i>	<i>14</i>
4.1.2	<i>Pásmový přepínač rychlosti.....</i>	<i>14</i>
4.2	OPTIMÁLNÍ TRAJEKTORIE	14
4.2.1	<i>Odvození a realizace optimální trajektorie.....</i>	<i>15</i>
4.2.2	<i>Vyhodnocení stavu b</i>	<i>17</i>
4.3	LINEÁRNÍ REGULÁTOR.....	18
4.4	PŘEPÍNAČÍ LOGIKA	18
4.5	PŘENOS SYSTÉMU	19
4.6	ŘÍZENÍ AZIMUTU	20
4.6.1	<i>Optimální trajektorie pro azimut.....</i>	<i>20</i>
4.6.2	<i>Měření regulátoru pro azimutu</i>	<i>20</i>
4.7	ŘÍZENÍ POHYBU VE SMĚRU OSY X	21
4.7.1	<i>Optimální trajektorie pro pohyb ve směru osy X</i>	<i>21</i>
4.7.2	<i>Měření regulátoru pro pohyb ve směru osy X</i>	<i>21</i>
4.8	ŘÍZENÍ VÝŠKOVÉHO MODELU	22
4.8.1	<i>Optimální trajektorie pro výškový model</i>	<i>22</i>
4.8.2	<i>Měření regulátoru pro výškový model.....</i>	<i>22</i>
4.9	ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	22
4.10	ALGORITMUS SUBOPTIMÁLNÍHO ŘÍZENÍ	23
KAPITOLA 5	RUČNÍ ŘÍZENÍ MODELU	25
5.1	PÁSMOVÝ PŘEPÍNAČ.....	26
5.1.1	<i>Pásmový přepínač polohy ovládacího prvku</i>	<i>26</i>
5.1.2	<i>Pásmový přepínač rychlosti.....</i>	<i>26</i>
5.2	VYTVOŘENÍ D-SLOŽKY.....	27

5.3	LINEÁRNÍ UDRŽOVÁNÍ ŽÁDANÉ HODNOTY.....	27
5.4	RELÉ	28
5.5	PŘEPÍNAČE	28
5.6	RUČNÍ ŘÍZENÍ AZIMUTU	28
5.7	RUČNÍ ŘÍZENÍ POHYBU VE SMĚRU OSY X	29
5.8	RUČNÍ ŘÍZENÍ VÝŠKOVÉHO MODELU	30
5.9	ZHODNOCENÍ RYCHLOSTNÍHO SERVOMECHANISMU.....	30
5.10	ALGORITMUS PRO RUČNÍ ŘÍZENÍ.....	32
KAPITOLA 6	SENZORICKÝ SYSTÉM.....	33
6.1	KOMPAS	34
6.2	AKCELEROMETRY	34
6.3	ULTRAZVUKOVÉ DÁLKOMĚRY	34
KAPITOLA 7	ZÁVĚR	35
PŘÍLOHA A.	SIGNÁLY SUBOPTIMÁLNÍ REGULACE S PI REGULÁTOREM	37
PŘÍLOHA B.	ALGORITMUS SUBOPTIMÁLNÍHO REGULÁTORU	39
PŘÍLOHA C.	ALGORITMUS RUČNÍHO ŘÍZENÍ	40
PŘÍLOHA D.	POPIS POUŽITÝCH FUNKCÍ VE VÝVOJOVÉM DIAGRAMU	41
PŘÍLOHA E.	UKÁZKA ČÁSTI ZDROJOVÉHO KÓDU PRO AUTONOMNÍ ŘÍZENÍ AZIMUTU	42
PŘÍLOHA F.	ZDROJOVÝ KÓD PRO RUČNÍ ŘÍZENÍ AZIMUTU	43
PŘÍLOHA G.	OBSAH PŘILOŽENÉHO CD	44

Seznam obrázků

Obrázek 2-1: Model vzducholodi	2
Obrázek 2-2: Blokové schéma zapojení.....	3
Obrázek 2-3: Palubní řídicí systém	3
Obrázek 2-4: Elektronický kompas	4
Obrázek 2-5: Elektronická inerciální jednotka.....	4
Obrázek 2-6: Ultrazvukový dálkoměr SRF10	5
Obrázek 2-7: Regulátor řízení otáček MD10DCR.....	5
Obrázek 3-1 : Přechodová charakteristika azimutu	7
Obrázek 3-2 : Porovnání matematického a experimentálního modelu	8
Obrázek 3-3 : Rozdělení pohybu v rovině XZ.....	9
Obrázek 3-4: Přechodová charakteristika pohybu vpřed	9
Obrázek 3-5: Porovnání aproximace přenosu pro pohyb ve směru osy X	10
Obrázek 3-6: Identifikace výškového modelu	11
Obrázek 4-1 : Blokové schéma nelineárního řízení	12
Obrázek 4-2 : Poloha bodu určující stav systému	13
Obrázek 4-3 : Polohový přepínač	14
Obrázek 4-4: Blokové schéma zapojení optimální trajektorie	15
Obrázek 4-5 : Trajektorie integračního a proporcionálního členu se zpožděním prvního řádu	16
Obrázek 4-6 : Optimální trajektorie a její aproximace	17
Obrázek 4-7 : Blokové schéma aproximace optimální trajektorie	17
Obrázek 4-8: Vyhodnocení stavu b.....	18
Obrázek 4-9 : Zapojení přepínací logiky	19
Obrázek 4-10 : Získání rychlosti systému	19
Obrázek 4-11: Signály suboptimálního regulátoru pro azimut	20
Obrázek 4-12: Časově suboptimální regulace pro pohyb ve směru osy X	21
Obrázek 4-13: Časově suboptimální regulátor pro výškový model.....	22
Obrázek 4-14: Konstanty časově suboptimálního regulátoru.....	23
Obrázek 4-15: Blokový diagram suboptimálního řízení	24
Obrázek 5-1 : Zapojení ručního regulátoru	26
Obrázek 5-2: Schéma vytvoření D-složky	27
Obrázek 5-3: Vyhodnocení přepnutí na lineární řízení	28
Obrázek 5-4: Nelineární rychlostní servomechanismus pro azimut	29
Obrázek 5-5: Nelineární rychlostní servomechanismus pro pohyb ve směru osy X	29
Obrázek 5-6: Nelineární rychlostní servomechanismus pro výškový model.....	30
Obrázek 5-7: Porovnání lineárního a nelineárního regulátoru rychlosti prvního řádu	31
Obrázek 5-8: Porovnání lineárního a nelineárního regulátoru rychlosti druhého řádu	31
Obrázek 5-9 : Blokový algoritmus ručního řízení.....	32
Obrázek 6-1: Měření kompasu	33

Kapitola 1

Úvod

Toto je pátá práce (Bittner, J., 2009, Müller, M., 2008; Perman, P., 2005, Wohlgemuth, J., 2005) zabývající se problematikou ovládání a řízení modelu vzducholodi. Práce se hlavně zaměřuje na možnosti efektivního řízení modelu s ohledem na dynamické vlastnosti modelu. Řízení bylo navrženo jak pro ruční řízení, tak i pro řízení pomocí sofistikovaného algoritmu, který bude schopen řídit vzducholodě.

Úvodní část práce se zabývá krátkým popisem komponent umístěných na modelu vzducholodi. Kompletní informace o vybavení, lze získat v publikaci [2]. Všechny využívané komponenty jsou původní a nebyly nikterak modifikovány či jinak nastavovány.

Třetí kapitola je věnována experimentální identifikaci modelu. Identifikované modely byly, pokud to bylo možné, porovnány s teoretickým odvozením.

Hlavní úkol této práce je zpracován v kapitole čtyři a pět. Kapitola čtyři je věnována autonomnímu řízení modelu vzducholodě. Cílem je let modelu podle předem zadané dráhy bez vnějšího zásahu. Předpokladem je, že na modelu bude algoritmus, podle kterého bude regulátoru známa dráha pohybu vzducholodě. Tyto informace lze například získávat z kamery, která bude na vzducholodi umístěna.

Kapitola pět je věnována regulátoru pro ruční řízení. Jde o situaci, kdy se nechceme s modelem přemístit z bodu A do bodu B, ale pouze řídit jeho rychlost. Cílem je dostat se na požadovanou rychlost v co nejkratším čase. Zastavení provést také co nejrychlejší způsobem.

V závěru jsou zhodnoceny dosažené výsledky. Možnostmi budoucího využití navržených regulátorů se také zabývá poslední kapitola.

Kapitola 2

Popis modelu

Model vzducholodi je tvořen dvouvrstvým pláštěm kapkovitého tvaru. Jako nadnášející medium je použito Hélium. Helium bylo vybráno především z hlediska bezpečnosti. Dále bylo ověřeno, že dochází poměrně k častému úniku do okolí a je nutnost pravidelně ho doplňovat. V případě znečištění helia je nutné vyměnit celý obsah za čisté (bez nečistot)¹.

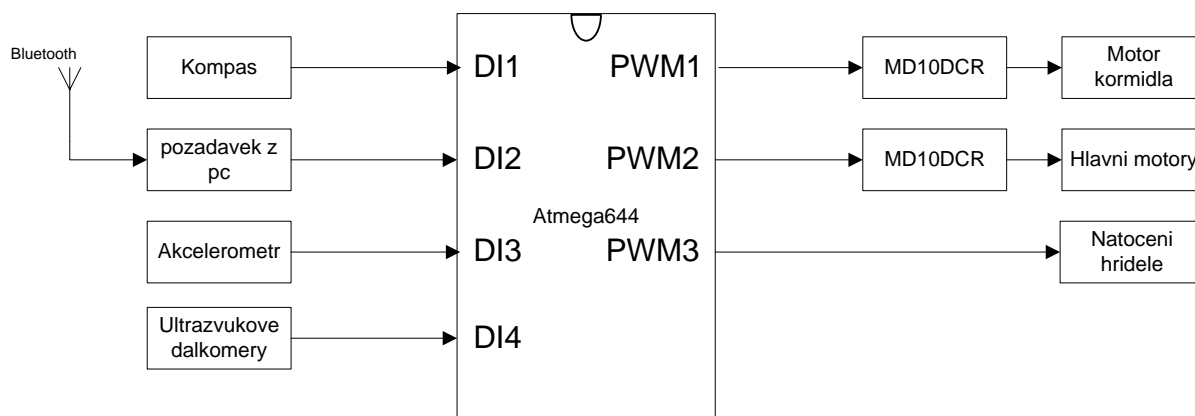
Model je poháněn dvěma motorky, které vzducholod' pohánějí ve všech směrech. Motorky jsou umístěny na otočné hřídeli, která je součástí gondoly, připnuté k plášti pomocí suchých zipů. Pro rychlé otočení je zde možné použít ocasní motor, tento motor byl využíván pro regulaci azimutu.



Obrázek 2-1: Model vzducholodi

Podrobný popis celého modelu lze najít v publikaci [2] nebo [1], proto jsou zde uvedeny pouze komponenty potřebné pro regulaci modelu. Stručné blokové schéma na obrázku 2-2 popisuje zapojení potřebných komponent pro regulaci. Obrázek 2-2 určuje číslo virtuálního vstupního pinu na který je daný senzor přiveden. Čísla neodpovídají skutečné hodnotě pinu na procesoru a jsou uváděna pouze pro jednodušší odkazování.

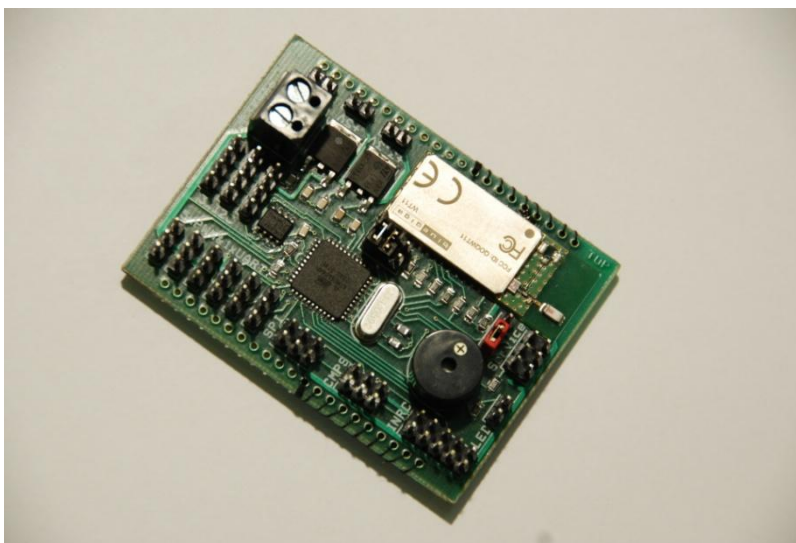
¹ Během nafukování se do pláště dostane i malé množství atomu vzduchu. Jelikož s pláště nejsnadněji unikají atomy helia, dochází ke zvýšení koncentrace nečistot.



Obrázek 2-2: Blokové schéma zapojení

2.1 Palubní řídicí systém

Jako řídicí systém byl vybrán procesor ATmega644. Program byl napsán pomocí jazyka C. Pro kompilaci a nahrání do paměti procesoru byl využit program CodeVisionAVR. Podrobné vysvětlení opět viz.[2], nebo datasheet procesoru viz.[6].



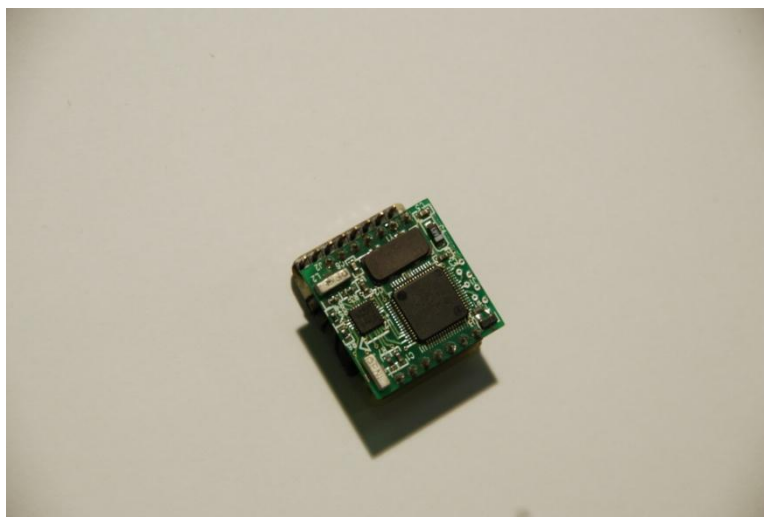
Obrázek 2-3: Palubní řídicí systém

2.2 Kompas

Při řízení modelu, bylo třeba zjišťovat rychlost pohybu modelu. Pro řízení azimutu bylo zvoleno sledování úhlové rychlosti. Úhlová rychlost je v této práci měřena nepřímo.

Pro zjištění úhlu, byl využit již zabudovaný kompas V2Xe, komunikující s procesorem pomocí sériové linky SPI. Napájen je stabilizovaným napětím (+3,3V). Vyčítání probíhá cyklicky s periodou 20ms, avšak perioda odpovědi kompasu se pohybuje okolo 0,5s. Datové listy kompasu viz.[7].

Dvouosý kompas není vhodný pro použití v systému, který se pohybuje ve všech třech osách. Pohyb ve třetí ose může způsobit chybu v měřených osách o velikosti až $\pm 10^\circ$. V laboratoři, kde je model zkoušen, je mnoho kovových přístrojů ovlivňující kompas.



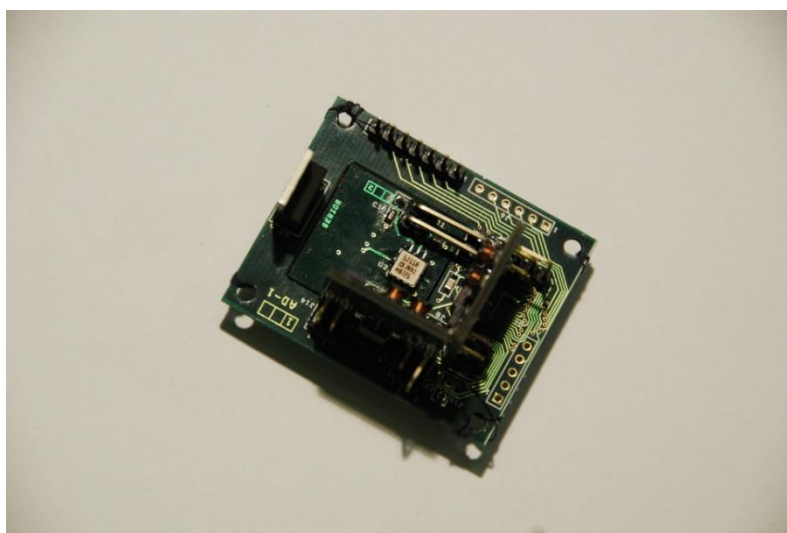
Obrázek 2-4: Elektronický kompas

2.3 Inerciální jednotka

Na modelu vzducholodě je umístěna inerciální jednotka složená ze tří analogových dvouosých akcelerometrů ADXL203. Z akcelerometrů získáme 6 hodnot zrychlení. Redundantní informaci o zrychlení využijeme pro zpřesnění měření.

Jednotka je také osazena třemi gyroskopy typu ADXRS 150. Jedná se o jednoosý senzor úhlové rychlosti. Principem je měření Coriolisova zrychlení.

Výstupem jednotky jsou úhly natočení stroje. Tyto úhly lze využít pro stabilizaci jiných komponent umístěných na modelu.



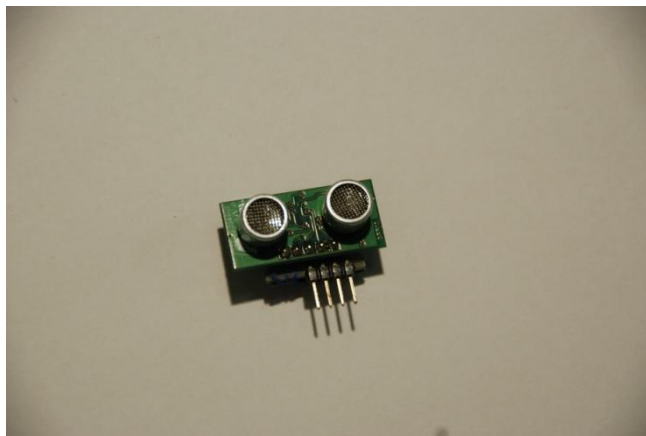
Obrázek 2-5: Elektronická inerciální jednotka

2.4 Ultrazvukové dálkoměry

Pro určování polohy vzducholodi jsou na špičce dva ultrazvukové dálkoměry svírající úhel přibližně 90°. Při takovém rozmístění je možno monitorovat celou šířku před modelem a detekovat překážky.

Určení letové hladiny probíhá pomocí dálkoměru umístěného na hřbetu vzducholodě. K určení se využívá odraz od stropu, který lze prohlásit za homogenní plochu, proto by nemělo docházet k chybám měření.

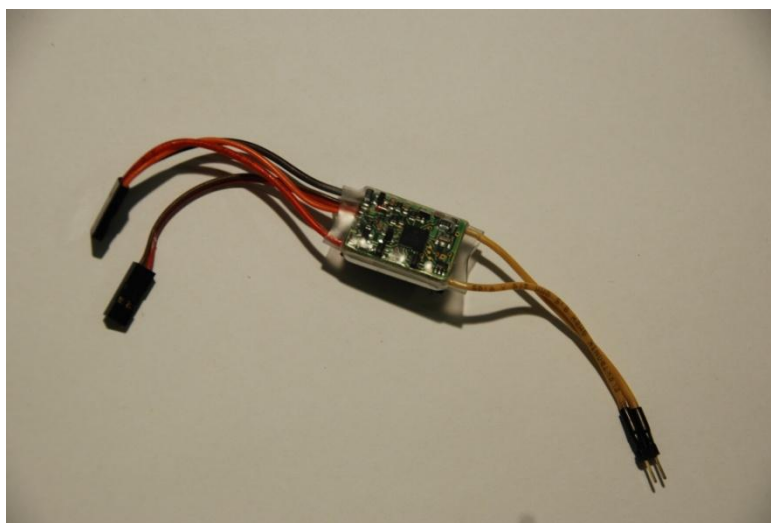
Všechny ultrazvukové dálkoměry komunikují pomocí sběrnici I²C. Možné je teoretické rozšíření až na 16 senzorů.



Obrázek 2-6: Ultrazvukový dálkoměr SRF10

2.5 Regulátor pro řízení otáček elektromotorů

Pro řízení stejnosměrných motoru MIG280 (či SPEED250) je využit regulátor pro řízení otáček elektromotorů MD10DCR. Podrobnější informace viz.[2].



Obrázek 2-7: Regulátor řízení otáček MD10DCR

Kapitola 3

Porovnání modelu

3.1 Teoretický model

V publikaci [1] byl ing. Müllerem odvozen teoretický model systému se šesti stupni volnosti. Takto stanovený model byl však příliš složitý na modelování a návrh regulátorů. Proto byl model rozdělen na dvě separátní části. Na otáčení kolem osy Z (azimut) a na pohyb v rovině XZ.

3.1.1 Otáčení kolem osy Z

Pro otáčení kolem osy Z (též Azimut) byl stanoven zjednodušený a linearizovaný přenos.

$$G_{\Psi(s)} = \frac{3.072}{s * (s + 0.138505)} \quad (3-1)$$

3.1.2 Pohyb v rovině XZ

Pro pohyb soustavy v rovině XZ byl, v publikaci [1], odvozen přenos.

$$G_{XZ(s)} = \frac{0.3274s + 0.02766}{s * (s^2 + 0.3411s + 0.02168)} \quad (3-2)$$

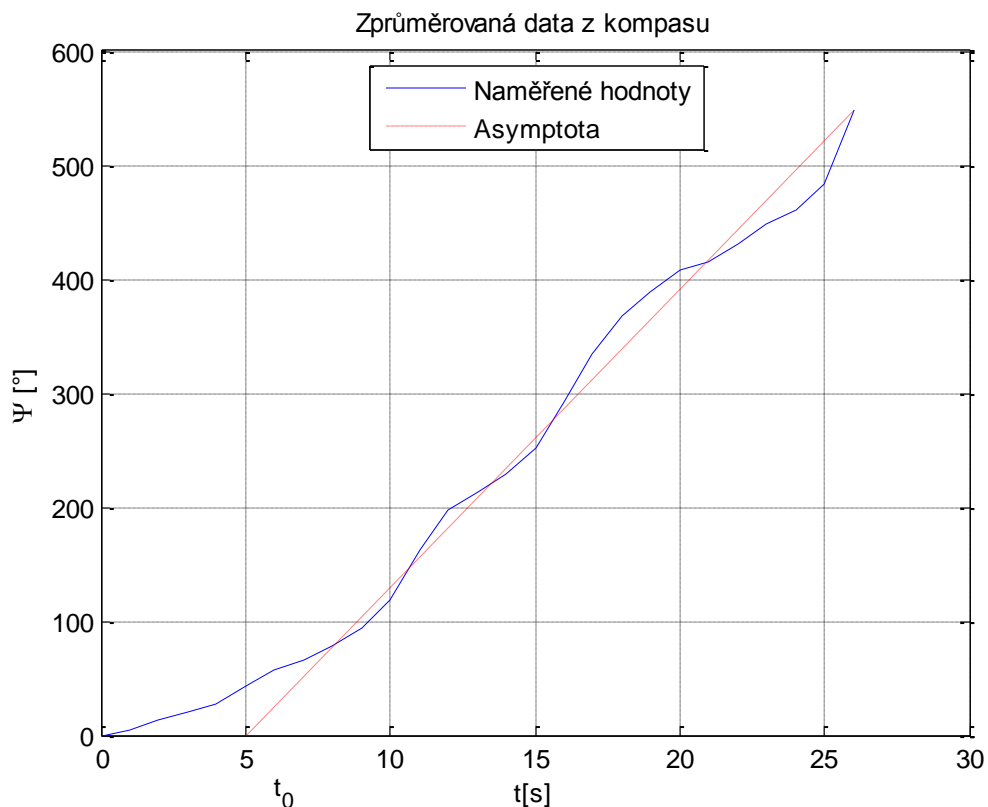
3.2 Experimentální ověření matematického modelu

Teoretický matematický model byl stanoven pro ideální podmínky. Bohužel ve skutečnosti není možné daných podmínek dosáhnout, proto se teoreticky odvozený model může lišit od skutečného systému. Z tohoto důvodu bylo potřeba porovnat teoretický model s modelem experimentálně zjištěným pomocí měření na skutečném modelu.

3.2.1 Měření azimutu

Jako vstupní signál pro určení reálného přenosu byl vybrán jednotkový skok. Jednotkový skok byl přiveden na ocasní vrtulku. V důsledku přivedení jednotkového skoku se vzducholod' začala otáčet kolem osy Z. Při přivedení jednotkového skoku na ocasní vrtulku model ztrácí výšku. Tato ztráta byla zanedbatelná.

Data o natočení modelu byla brána z kompasu, který je součástí palubní elektroniky modelu. Výsledná přechodová charakteristika byla určena jako průměr tří nezávislých měření. Čímž minimalizujeme chybu měření.



Obrázek 3-1 : Přechodová charakteristika azimutu

3.2.1.1 Identifikace přenosu azimutu

Z Obrázku 3-1 je patrné, že měřený model se podobá soustavě integračního typu se zpožděním.

Obecný přenos systému pro integrační soustavu se zpožděním.

$$G_{m(s)} = \frac{1}{T_I} \frac{1}{s * (T_1 * s + 1)^n} \quad (3-3)$$

Pro stanovení experimentálního modelu je potřeba určit konstanty z přechodové charakteristiky (Obrázek 3-1). Celé odvození lze najít v publikaci [3].

$$t_0; y_{(t_0)}; y_1 \quad (3-4)$$

t_0 čas, kdy asymptota protne osu x

$y_{(t_0)}$ hodnota v čase t_0

$y_1 = \frac{1}{T_I}$ je hodnota přenosu v čas $t=1$

Pomocná konstanta **A** je definovaná.

$$A = \frac{y(t_0)}{\frac{t_0}{T_1}} \quad (3-5)$$

V závislosti na pomocné konstantě **A** lze určit řád systému pomocí tabulky 3-1.

n	1	2	3	4
A	0,368	0,271	0,224	0,195

Tabulka 3-1 : Řád systému podle konstanty A

Časová konstanta **T₁** je definovaná

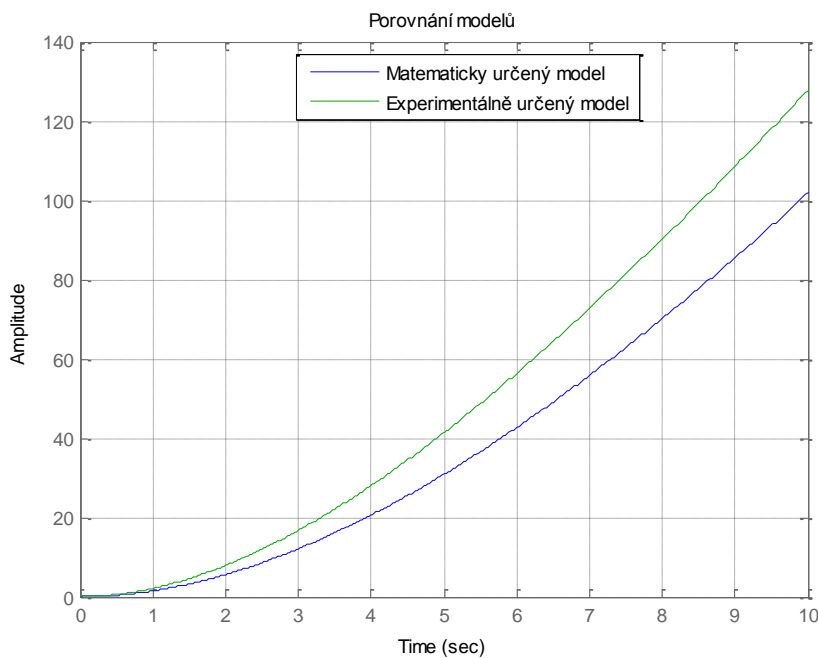
$$T_1 = \frac{t_0}{n} \quad (3-6)$$

Z obrázku 3-1 byly odečteny hodnoty konstant definovaných v rovnici 3-4. Po dosažení odečtených hodnot lze psát přenos.

$$G_{\Psi_{ex}(s)} = \frac{4.5}{s * (s + 0.2)} \quad (3-7)$$

3.2.1.2 Porovnání přenosů pro azimut

Experimentálně určený přenos (3-7) se shoduje s teoreticky odvozeným přenosem (3-1). Drobné rozdíly v koeficientech jsou způsobeny nevyvážeností modelu, nepřesností měření a neideálními okolními podmínkami. Z důvodu proměnlivosti okolních podmínek není potřeba přenos modelu určovat přesněji a model uvedený v rovnici (3-7) je postačující.

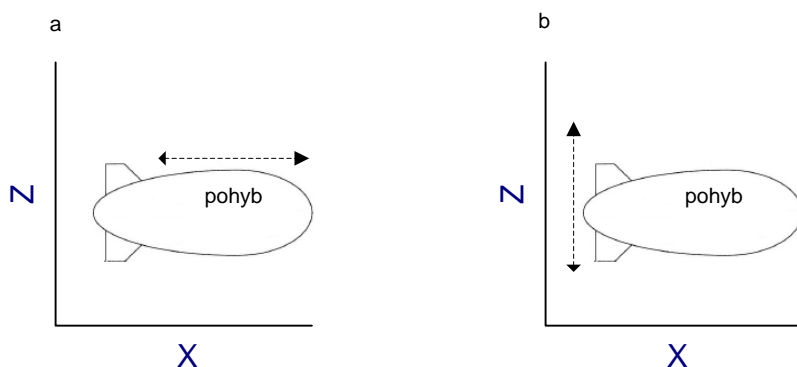


Obrázek 3-2 : Porovnání matematického a experimentálního modelu

3.2.2 Měření pohybu v rovině XZ

Pohyb v rovině XZ byl, pro účely této práce, rozdělen na dva pohyby. Pohyb ve směru X (složka Z a Y je neměnná), čemuž odpovídá pohyb modelu v před a vzad. Druhým pohybem je změna výšky (složka Z se mění, X a Y se nemění).

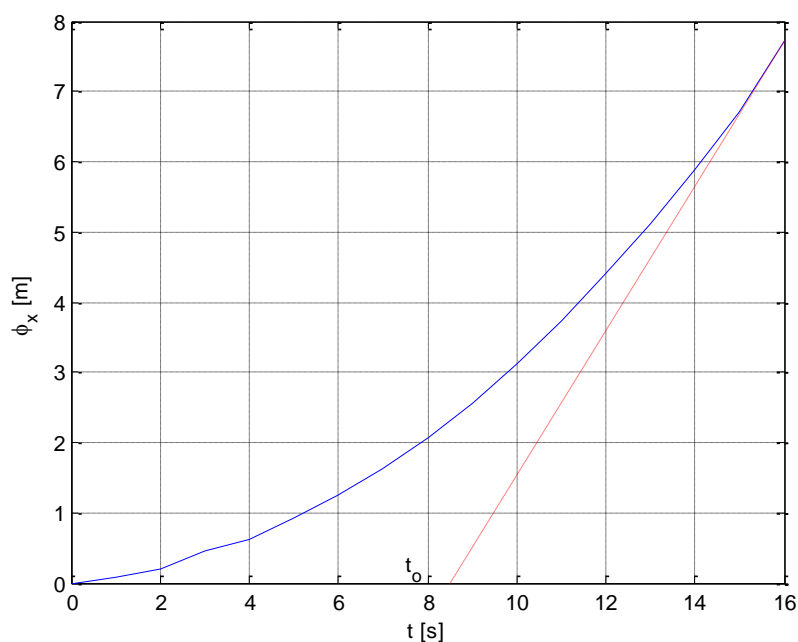
Porovnání s publikací [1] nelze provést, protože v této práci nebylo uvažováno otáčení hřídele.



Obrázek 3-3 : Rozdělení pohybu v rovině XZ

3.2.2.1 Měření pohybu ve směru X

Při pohybu ve směru X je hřídel v rovnovážné poloze a ke změně směru pohybu se využívá změna otáčení vrtulek. (viz. Obrázek 2-1). Pro eliminování chyby byla data naměřená několikrát a výsledek byl průměrován.



Obrázek 3-4: Přejímová charakteristika pohybu vpřed

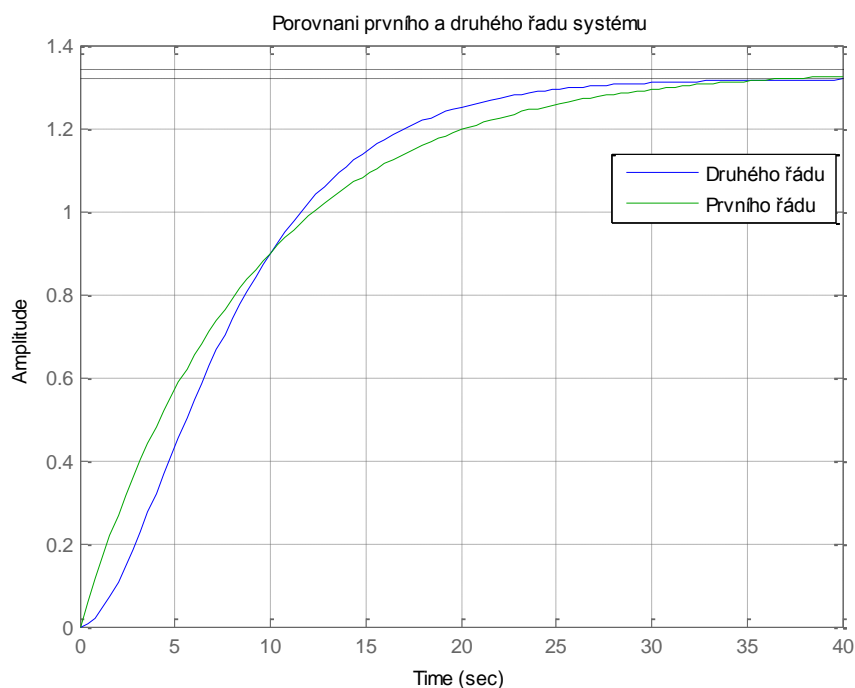
Pomocí stejného postupu jako v kapitole 3.2.1.1, byly určeny konstanty a stanoven výsledný přenos soustavy.

$$G_{\varphi x(s)} = \frac{0.073}{s(s+0,2)^2} \quad 3-8$$

Přenos určený v rovnici 3-8 je třetího řádu a celé řešení by bylo potřeba modifikovat z fázové roviny do fázového prostoru. Tento postup by byl příliš komplikovaný a tak bylo rozhodnuto přenos 3-8 aproximovat přenosem druhého řádu.

Pro účely snadnější aproximace byl zanedbán integrační člen. Výsledný přenos již byl pouze druhého řádu. Tento pozměněný přenos byl dále zjednodušen z druhého řádu na řád první.

$$G_{\varphi xap(s)} = \frac{0,149}{(s+0,11)} \quad (3-9)$$



Obrázek 3-5: Porovnání aproximace přenosu pro pohyb ve směru osy X

Obrázek 3-5 porovnává změřený přenos druhého stupně s přenosem, který vznikl aproximací a je řádu jedna. Při tomto postupu se dopouštíme nepřesností, které se projeví zejména v nelineární části řízení. Díky použití lineárního řízení při dojezdu modelu, kdy budeme používat skutečný přenos 3.řádu, si můžeme tuto chybu dovolit.

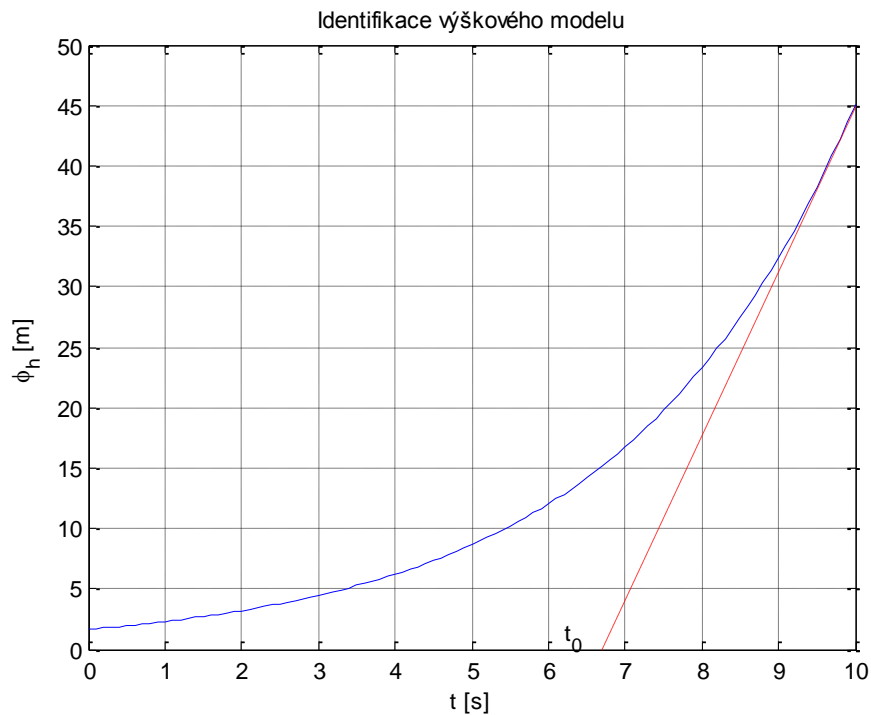
Výsledný přenos pro pohyb ve směru osy x je uveden v rovnici 3-10. Tento přenos již umožňuje využití řízení podle fázové roviny, které je odvozeno dále (4.2).

$$G_{\varphi(s)} = \frac{0,149}{s * (s + 0,11)} \quad (3-10)$$

3.2.2.2 Výškový model

Měření výšky je prováděno pomocí ultrazvukového dálkoměru (viz. 2.4) umístěného na vrchu vzducholodi. Byl měřen odraz od stropu místnosti. Od naměřené hodnoty, byla odečtena hodnota 5,72, což odpovídá výšce místnosti.

Pro identifikaci výškového modelu byla hřídel otočena kolmo k zemi, aby se dosáhlo největší efektivity pro kolmý vzlet vzducholodi.



Obrázek 3-6: Identifikace výškového modelu

Pomocí stejného postupu jako v kapitole 3.2.1.1, byly určeny konstanty a výsledný přenos soustavy.

$$G_h = \frac{2.23}{s(s + 0.15)} \quad (3-11)$$

Přenos výškového modelu (3-11) je druhého řádu a může být využit v nelineárním řízení.

Kapitola 4

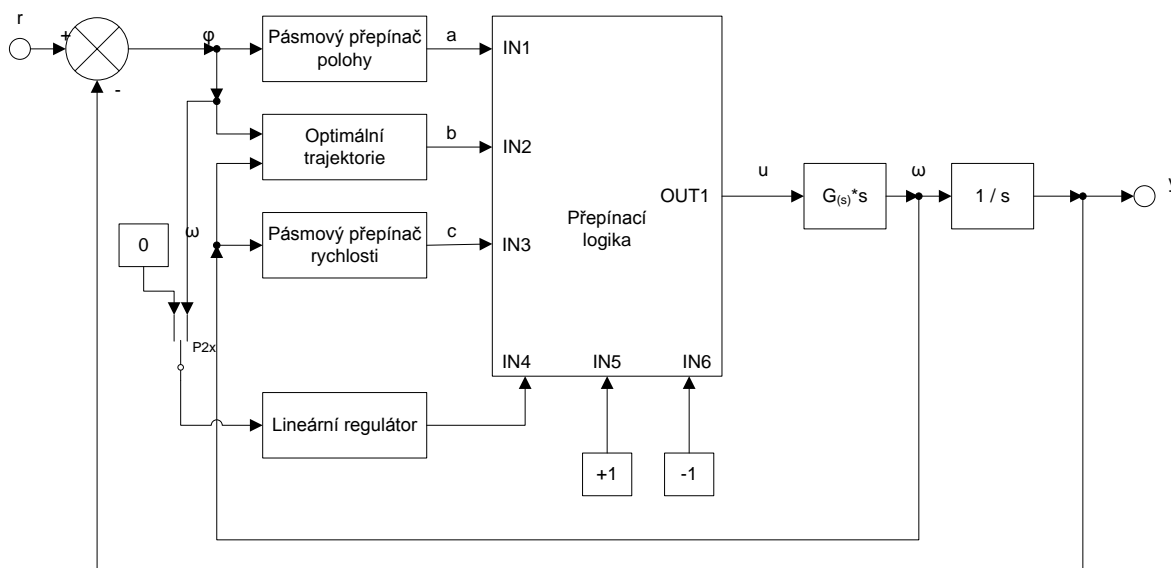
Autonomní řízení modelu

Nejdříve se nabízela varianta použití lineárního řízení (PI, PD, PID atd.). Daná možnost byla po konzultaci s vedoucím bakalářské práce zavrhnuta, neboť při lineární regulaci dochází k postupnému zmenšování napětí na motoru a snižování otáček vrtule (snížení rychlosti modelu). V určitém čase klesne tažná síla² tak nízko, že je model velmi náchylný na jakékoliv změny proudění vzduchu v prostředí. Konečná pozice modelu se tedy může značně lišit a model bude mít nenulovou ustálenou odchylku a jeho ustálení trvá příliš dlouho.

Jako optimální možnost byla zvolena časově suboptimální regulace. Nelineární regulátor je jednoduchý přepínač mezi maximálním tahem v jednom směru (rozjetí) a maximálním tahem v opačném směru (brzdění). Samotný nelineární regulátor končí v mezním cyklu³, jelikož model není schopný zastavit přesně na žádané hodnotě, tudíž začne maximálně brzdit a pak se maximálně rozjíždět. Popsaný problém se dříve odstraňoval pomocí korekcí. V této práci, byl zvolen způsob přepnutí na lineární regulátor, který pomalu dovede model do rovnovážného stavu⁴.

Autonomní řízení bylo navrženo s ohledem na budoucí rozšíření o sofistikované postupy prohledávání okolí, kdy model bude dostávat posloupnost informací o poloze. Pomocí této posloupnosti se model bude pohybovat po předem určené trase.

Další možností je řídit systém pomocí ovladače⁵ z pozemní stanice. V tomto případě nebude model přijímat žádanou hodnotu, ale pouze informaci o velikosti tažné síly. Podrobněji Kapitola 5.



Obrázek 4-1 : Blokové schéma nelineárního řízení

² Síla, která pohání vzducholoď v požadovaném směru.

³ Též. Limitní cyklus.

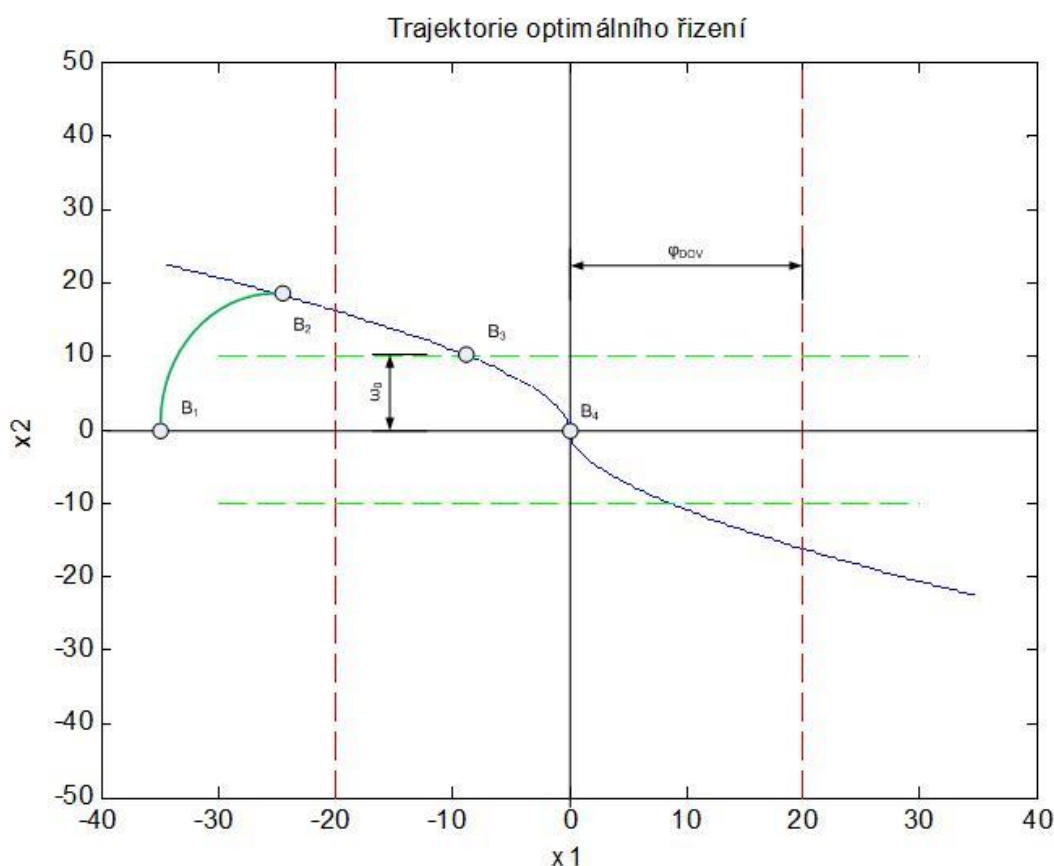
⁴ Rovnovážným stavem rozumíme stav kdy je systém ustálen a bez pohybu.

⁵ V této práci pomocí joysticku.

Vysvětlení veličin na Obrázku 4-1.

- r žádaná veličina (též. vstupní veličina)
- φ odchylka (poloha)
- ω rychlost podle optimální trajektorie (též optimální rychlost)
- R okamžitá rychlost
- a vnitřní proměnná sekvenčního obvodu pro polohu
- b vnitřní proměnná sekvenčního obvodu určující polohu
zástupného bodu
- c vnitřní proměnná sekvenčního obvodu pro rychlost
- u akční zásah
- P_{2x} přepínač zajišťuje spuštění lineárního regulátoru s nulovými
počátečními podmínkami

Pro správné řízení modelu je nejprve potřeba znát trajektorii optimálního řízení (viz 4.2). Pomocí trajektorie optimálního řízení může přepínací logika určit, jakým způsobem se bude model řídit a také jaká bude velikost akčního zásahu.



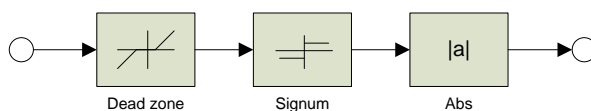
Obrázek 4-2 : Poloha bodu určující stav systému

Počáteční podmínky modelu odpovídají bodu B1, tj. $|\varphi| > |\varphi_{DOV}|$ a libovolné rychlosti. Nejprve dochází k maximálnímu rozjetí modelu jedním směrem. Směr otáčení je vyhodnocen v přepínací logice (viz Obrázek 4-1). Ve chvíli kdy model dosáhne bodu B2, který leží přímo na trajektorii optimálního brzdění, je na motor přiveden maximální akční zásah v opačném směru než je směr, ve

kterém se model rozjížděl z bodu B1. Brzdění dále pokračuje po optimální trajektorii až do bodu B3. V bodě B3 je přepnuto z nelineárního řízení na řízení pomocí lineárního regulátoru a systém dojde do rovnovážného bodu B4, kde celý proces skončí.

4.1 Pásmový přepínač

Pásmový přepínač určuje, zda proměnná překonala předem dané meze. V případě, že proměnná je menší než zadaná mez, je na výstupu přepínače log 0. V opačném případě je na výstupu log 1.



Obrázek 4-3 : Polohový přepínač

Na obrázku 4-3 je nakreslené blokové schéma pásmového přepínače zapojeného v programu Matlab. Dead zone má na výstupu nulu pro vstupní hodnoty menší než absolutní hodnota zadané meze. Ostatní vstupní hodnoty projdou beze změny. Funkce signum má na výstupu hodnoty 0, -1 nebo 1. Jelikož na výstupu celého polohového přepínače je potřeba pouze 0, nebo 1, proto signál nakonec projde funkcí absolutní hodnota.

4.1.1 Pásmový přepínač polohy

V případě, že odchylka je menší než daná mez, není žádoucí řídit systém nelineárně. Pokud by se tak stalo, systém by neměl čas dosáhnout optimální trajektorie a došlo by k překročení trajektorie a hrozilo by rozkmitání celého modelu. V důsledku rozkmitání vzroste doba ustálení a regulace by byla značně nevýhodná. Polohový přepínač polohy ovládá vnitřní proměnnou a .

$$\begin{aligned} |\varphi| > |\varphi_{DOV}| &\Rightarrow a = \log .1 \\ |\varphi| < |\varphi_{DOV}| &\Rightarrow a = \log .0 \end{aligned} \quad (4-1)$$

4.1.2 Pásmový přepínač rychlosti

Pokud rychlost systému klesne pod určitou mez a je blízko nulové rychlosti, není možné dále řídit nelineárně, jelikož by se dostal do mezního cyklu. Pro zamezení tomuto jevu je potřeba přepnout na řízení lineární. Polohový přepínač rychlosti ovlivňuje vnitřní proměnnou c .

$$\begin{aligned} |\omega| > |\omega_0| &\Rightarrow c = \log .1 \\ |\omega| < |\omega_0| &\Rightarrow c = \log .0 \end{aligned} \quad (4-2)$$

4.2 Optimální trajektorie

Na obrázku 4-2 je popsán pohyb zástupného bodu (B) nelineárního řízení ve fázové rovině. Poloha zastupujícího bodu vůči optimální trajektorii určuje polohu (směr) a postup (maximální rozjezd – maximální brzdění) nelineárního akčního zásahu v závislosti na polaritě odchylky.

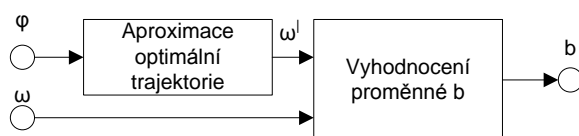
Celá fázová rovina (viz.Obrázek 4-2) je rozdělena na dvě poloroviny. První polorovina (byla označena například P_0) je pod čarou optimální trajektorie a druhá polorovina (P_H) je nad touto čarou.

Stav zástupného bodu byl označen jako b . V polorovině P_D je postup nelineárního akčního zásahu v pořadí $+-$, v polorovině P_H je postup opačný $(-+)$.

$$\begin{aligned} b \in P_D &\Rightarrow b = \log .1 \\ b \in P_H &\Rightarrow b = \log .0 \end{aligned} \quad (4-3)$$

Celé vyhodnocení stavu b se skládá ze dvou bloků. První je aproximace optimální trajektorie a druhý je porovnání skutečné rychlosti s rychlostí získanou přes fázovou rovinu.

Celé vyhodnocení stavu b se skládá ze dvou bloků. Aproximace optimální trajektorie se vstupní hodnotou φ , pomocí níž získáme odpovídající ω^I z optimální trajektorie. Druhý blok porovnává skutečnou rychlost s rychlostí získané z aproximace optimální trajektorie. Toto porovnání určuje polohu zastupujícího bodu vůči optimální trajektorii ve fázové rovině.



Obrázek 4-4: Blokové schéma zapojení optimální trajektorie

4.2.1 Odvození a realizace optimální trajektorie

Pro sériové zapojení integračního členu a proporcionálního členu se zpožděním prvního řádu lze psát diferenciální rovnici.

$$T^* \ddot{y}_{(t)} + \dot{y}_{(t)} = K^* u_{(t)} \quad (4-4)$$

Stavové proměnné $x_1; x_2$ jsou definovány.

$$\begin{aligned} x_1 &= y \\ x_2 &= \dot{x}_1 = \dot{y} \end{aligned} \quad (4-5)$$

Zavedeme první derivace stavových proměnných $x_1; x_2$, dosadíme z rovnic 4-4 a 4-3 a nakonec upravíme

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_{2(t)} \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{T} x_{2(t)} + \frac{K^* U}{T} \end{aligned} \quad (4-6)$$

Po vhodné úpravě rovnice 4-5 a dosazení do rovnice 4-3, dosáhneme vztahu mezi stavovými proměnnými $x_1; x_2$. Celé odvození viz. [4].

$$x_{1(t)} = T^* \left[x_{2(t_0)} - x_{2(t)} + K^* U^* \ln \left(\frac{x_{2(t_0)} - K^* U}{x_{2(t)} - K^* U} \right) \right] + c \quad (4-7)$$

Pro účely stanovení optimální trajektorie systému byly zanedbány počáteční podmínky, jelikož se předpokládá, že model vždy začíná v rovnovážném stavu.

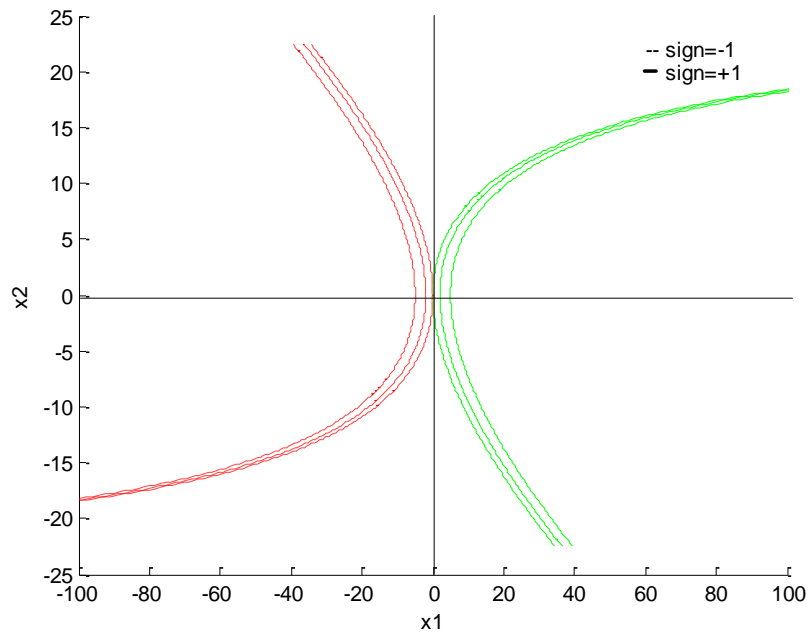
$$x_{1(t)} = T * \left[-x_{2(t)} + K * U * \ln \left(\frac{-K * U}{x_{2(t)} - K * U} \right) \right] + c \quad (4-8)$$

T, K jsou konstanty diferenciální rovnice

U je vstup systému

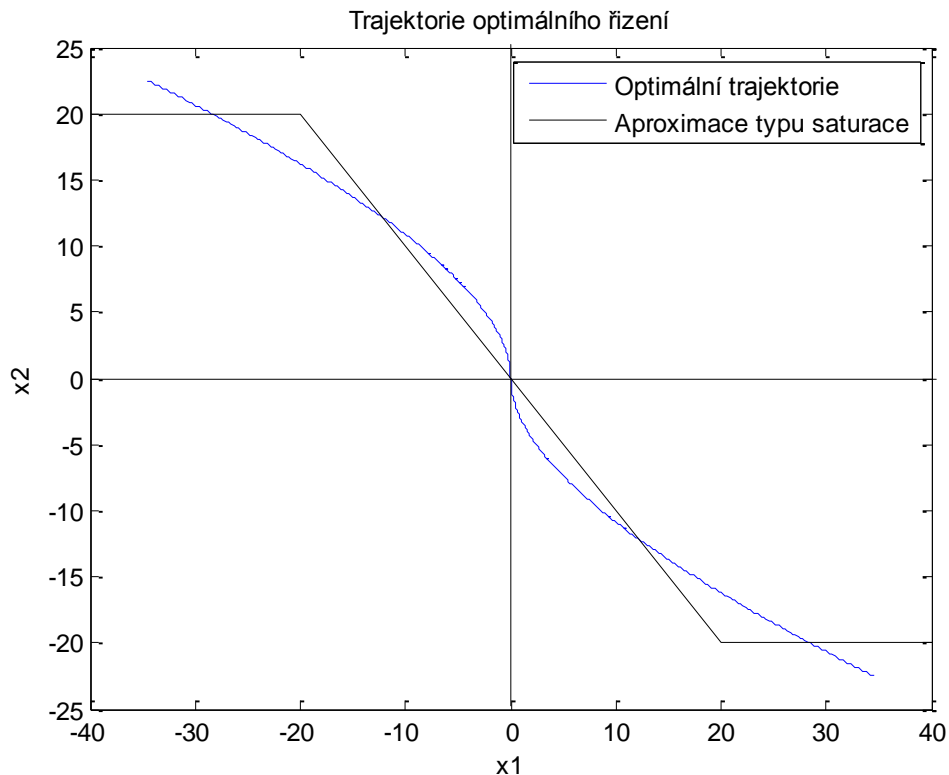
x_1, x_2 stavové proměnné

$c = x_{2(t_0)}$ počáteční stav



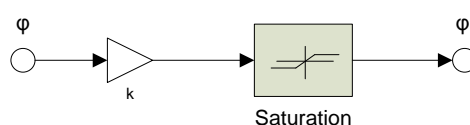
Obrázek 4-5 : Trajektorie integračního a proporcionálního členu se zpožděním prvního řádu

Na obrázku 4-5 jsou nakreslené trajektorie pro různá c (rovnice 4-7). Optimální trajektorii nazýváme trajektorii, pro kterou $c=0$ a vybíráme $\text{sign}=-1$ pro 4. kvadrant (resp. $\text{sign}=+1$ pro 2. kvadrant). Funkce na obrázku 4-5 je logaritmického charakteru.



Obrázek 4-6 : Optimální trajektorie a její aproximace

Logaritmická funkce by se obtížně realizovala. Daná funkce byla v našem případě, s akceptováním jisté chyby nelineárního řízení, kterou odstraníme řízením lineárním, nahrazena přímkou se sklonem k . Z fyzikální podstaty vyplývá, že rychlost nemůže růst nadevše meze, proto je obrázek 4-5 aproximován funkcí saturace. Meze saturace je maximální možná rychlost systému.



Obrázek 4-7 : Blokové schéma aproximace optimální trajektorie

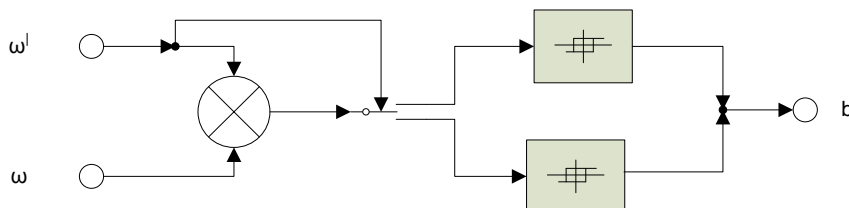
Blokové schéma aproximace optimální trajektorie je nakresleno na obrázku 4-7. Zesilovač vynásobí vstupní signál sklonem přímky, která aproximuje optimální trajektorii. V Matlabu, nenajdeme saturaci se záporným sklonem přímky, proto zesilovací činitel k musí být vždy volen záporný.

4.2.2 Vyhodnocení stavu b

Z důvodu nebezpečí rozkmitání senzoru stavu b, není možné pouze komparovat okamžitou rychlost modelu (ω) a rychlost přepočtenou přes fázovou rovinu (ϕ^l). Ve chvíli, kdy systém dosáhne bodu B2 (Obrázek 4-2) dojde k obrácení akčního zásahu na motoru a dále by mělo brzdění probíhat po dráze optimální trajektorie. V tomto systému bylo uvažováno pouze s aproximací optimální trajektorie. Je možné, že se zástupný bod dostane chvilkově opět pod

optimální trajektorii a došlo by k přepólování motoru. Tento proces je značně nežádoucí, neboť by model brzdil kmitavě. Důsledkem kmitavého brzdění by se protáhla doba ustálení.

Pro odstranění byla použita hystereze, která vytvoří pásmo necitlivosti kolem zvolené optimální trajektorie s pamětí správného původního vyhodnocení.



Obrázek 4-8: Vyhodnocení stavu b

4.3 Lineární regulátor

D-složka je již tvořena nelineárním charakterem regulátoru, tudíž není potřeba jí vytvářet i pomocí lineárního regulátoru. Jako optimální řešení byl zvolen PI regulátor.

Na vstup regulátoru je přivedena odchylka, až ve chvíli kdy je používán . Tímto postupem bylo dosaženo, že PI regulátor vždy začíná s nulovými počátečními podmínkami. Připnutí se děje pomocí přepínače P_{2x} (viz. Obrázek 4-1).

Konstanty lineárního regulátoru byly stanoveny pomocí frekvenční metody. Frekvenční metoda využívá empiricky stanovených vzorců. Vzorce jsou stanoveny pro druhý řád. Doladěny byly v matematickém programu Matlab. Výsledkem jsou konstanty pro co nejmenší překmit a nejkratší dobu ustálení.

4.4 Přepínací logika

Přepínací logika vyhodnocuje okamžitou polohu zastupujícího bodu servomechanizmu ve fázové rovině. Podle toho přepíná na maximální tah v jednom směru, či ve směru opačném. Pokud se systém přiblíží nulovému bodu (Obrázek 4-2 B_4), tak přepínací logika přepne na lineární řízení.

Přepínací logiku řídí tři vnitřní proměnné. Proměnná pro polohu, který byl označen jako a . Hodnoty vnitřní proměnné a jsou popsány v rovnici 4-1. Proměnná a se nastaví v případě, že absolutní odchylka systému se zmenší pod určitou mez.

Vnitřní proměnná rychlosti byla označena písmenem c . Hodnoty proměnné c jsou popsány v rovnici 4-2. Proměnná c se nastaví v případě, že rychlost systému klesne pod určitou mez.

Pro realizaci stačí dva přepínače, které označíme $P_1; P_2$. Přepínače se přepínají v závislosti na vnitřních proměnných a, b, c .

$$\begin{aligned} P_1 &= \bar{b} \\ P_2 &= a + cp_2 \end{aligned} \quad (4-9)$$

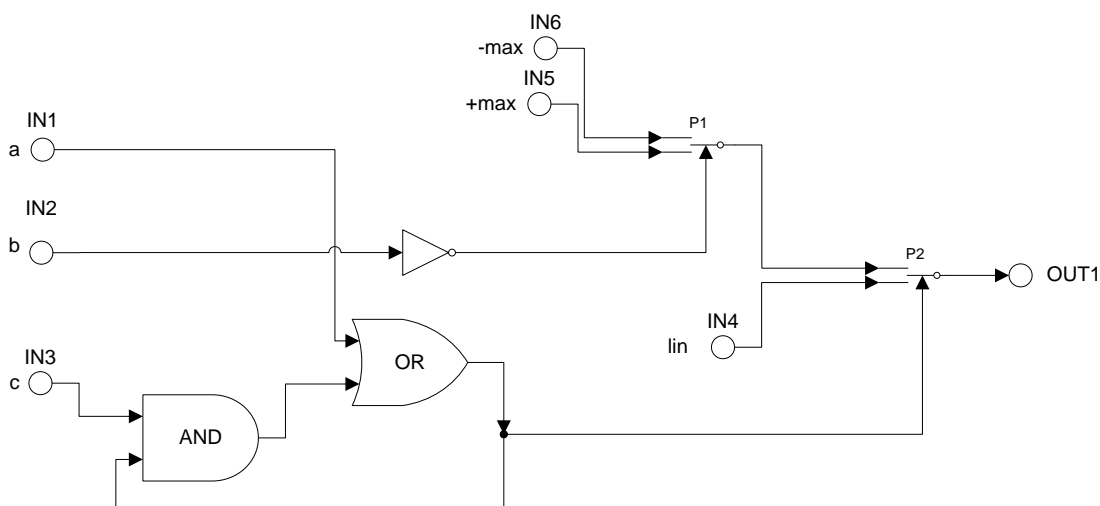
Sekvenční obvod má tři stavy. Označíme je $Z_1; Z_2; Z_3$. Stav Z_1 říká, že se motor točí maximálně vpřed a tudíž na výstup přepínací logiky je přivedena hodnota ze vstupu IN5 (Obrázek 4-1). Stav Z_2

označuje maximální točení motoru vzad a na výstup přepínací logiky je přiveden vstup IN6. Posledním stavem je stav Z_3 , který na výstup přepínací logiky přivádí lineární řízení (Obrázek 4-1 – IN4).

$$\begin{aligned} Z_1 &= \bar{p}_1 p_2 \\ Z_2 &= p_1 p_2 \\ Z_3 &= \bar{p}_2 \end{aligned} \quad (4-10)$$

Pomocí rovnic 4-9, lze nakreslit schéma zapojení přepínací logiky. Na vstup IN1 je přiveden logický signál z pásmového přepínače polohy (viz. 4.1.1). Na vstup IN2 je přiváděn stav b. Logický signál z pásmového přepínače rychlosti byl přiveden na vstup IN3. Vstup IN5 (resp. IN6) reprezentují kladné maximální otáčení (resp. záporné maximální otáčení). Výstup z lineárního regulátoru⁶ je přiveden na vstup IN4 (viz 4.3)

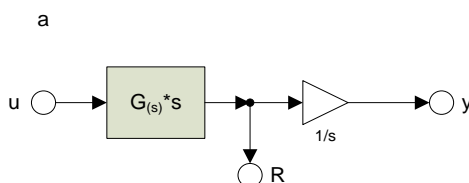
Přepnutí z nelineárního na lineární řízení probíhá s nulovými počátečními podmínkami. Lineární regulátor není trvale připojen na odchylce, ale je připnut zároveň s přepnutím přepínače P_2 .



Obrázek 4-9 : Zapojení přepínací logiky

4.5 Přenos systému

Systém je modelován jako zpoždění 1. řádu v sériovém spojení s integrátorem. Rychlost je zjišťována před integrátorem.



Obrázek 4-10 : Získání rychlosti systému

⁶ Též akční zásah

4.6 Řízení azimutu

V kapitole 3.2.1 byl stanoven přenos systému pro otáčení kolem osy Z (azimut). Zapojení bylo simulováno v matematickém programu Matlab.

4.6.1 Optimální trajektorie pro azimut

Odvození a zapojení optimální trajektorie je popsáno v kapitole 4.2. Pro azimut lze dosadit do rovnice 4-4 odměřené konstanty.

$$\begin{aligned} T &= 5 \\ K &= 22.5 \end{aligned} \quad (4-11)$$

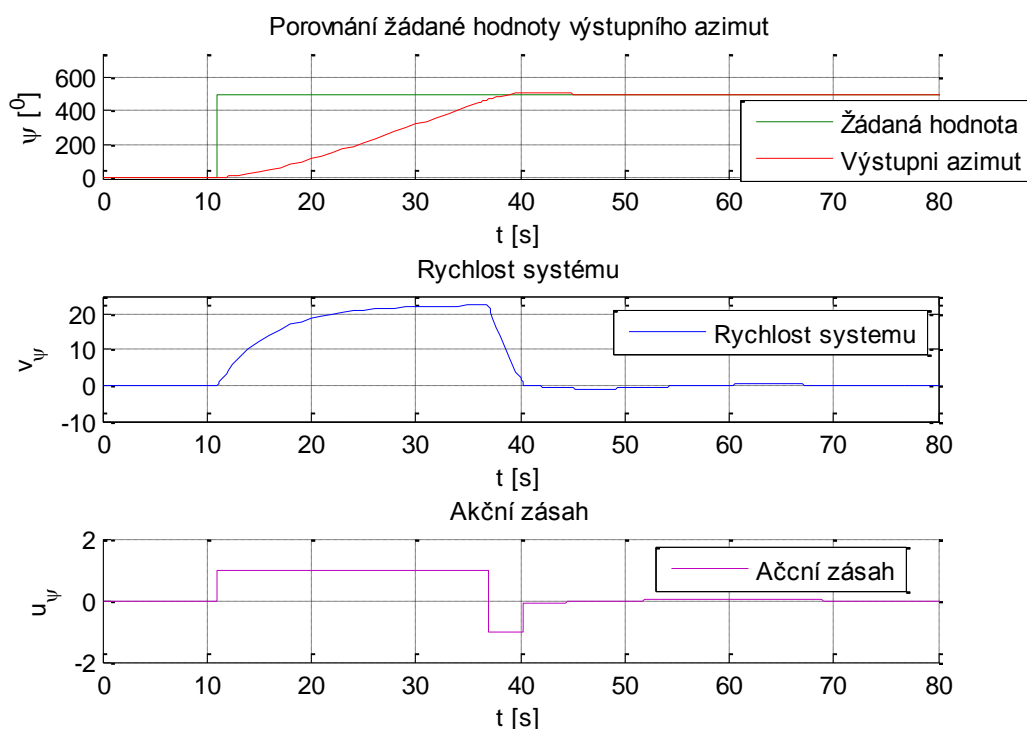
Aproximace optimální trajektorie pro otáčení kolem osy Z. Konstanta k je sklon přímky a U_{SAT} je maximální rychlost.

$$\begin{aligned} k &= 0,7678 \\ |U_{SAT}| &= 4,5 \end{aligned} \quad (4-12)$$

4.6.2 Měření regulátoru pro azimut

Měření proběhlo pouze pomocí simulačního programu Matlab. Celý systém funguje i bez použití PI regulátoru, avšak s PI regulátorem je ustálená odchylka prakticky nulová.

Obrázek 4-11 znázorňuje průběhy suboptimálního regulace pro požadavek o změnu azimutu. Příloha A znázorňuje odezvy systému pro dva po sobě jdoucí požadavky o změně polohy (azimut).



Obrázek 4-11: Signály suboptimálního regulátoru pro azimut

4.7 Řízení pohybu ve směru osy X

V kapitole 3.2.2.1 byl stanoven přenos pro pohyb vzducholodě ve směru osy X. Přenos byl třetího řádu a jeho aplikace by vyžadovala modifikovat zapojení na řízení podle fázového prostoru. V této práci bylo zvoleno nahrazení přenosu třetího řádu přenosem řádu druhého (viz. Obrázek 3-5). Nahrazení zavádí chybu, která je ale vykompenzovaná při přepnutí na řízení lineární.

4.7.1 Optimální trajektorie pro pohyb ve směru osy X

Do rovnice trajektorie optimálního řízení dosadíme následující konstanty.

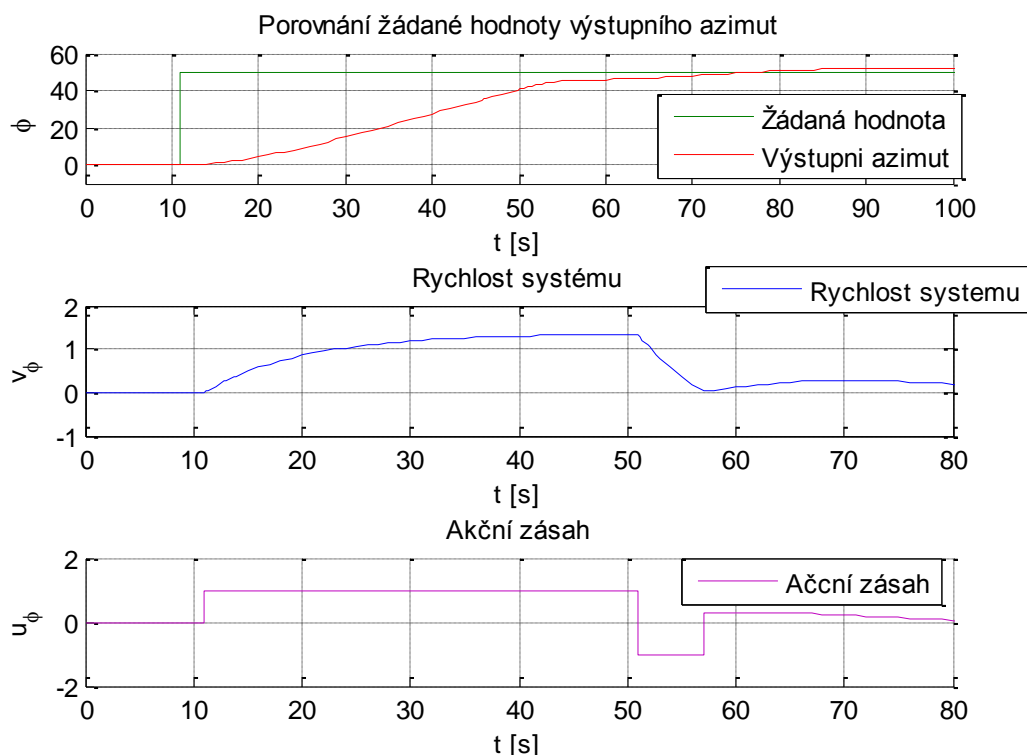
$$\begin{aligned} T &= 9 \\ K &= 1.35 \end{aligned} \quad (4-13)$$

Omezení aproximace trajektorie a její skolen

$$\begin{aligned} k &= -0,1419 \\ |U_{SAT}| &= 0.6 \end{aligned} \quad (4-14)$$

4.7.2 Měření regulátoru pro pohyb ve směru osy X

Ověření časově suboptimálního regulátoru proběhlo (stejně jako pro azimut viz.3.2.1) v matematickém programu Matlab. Celé zapojení je ve shodě s dříve odvozenými závěry (viz Kapitola 4)



Obrázek 4-12: Časově suboptimální regulace pro pohyb ve směru osy X

4.8 Řízení výškového modelu

V kapitole 3.2.2.2 byl stanoven přenos pro změnu letové hladiny modelu. Přenos je druhého stupně a není potřeba ho nikterak upravovat

4.8.1 Optimální trajektorie pro výškový model

Při dosazení za neznámé v rovnici 4-4 je dosaženo rovnice pro optimální trajektorii

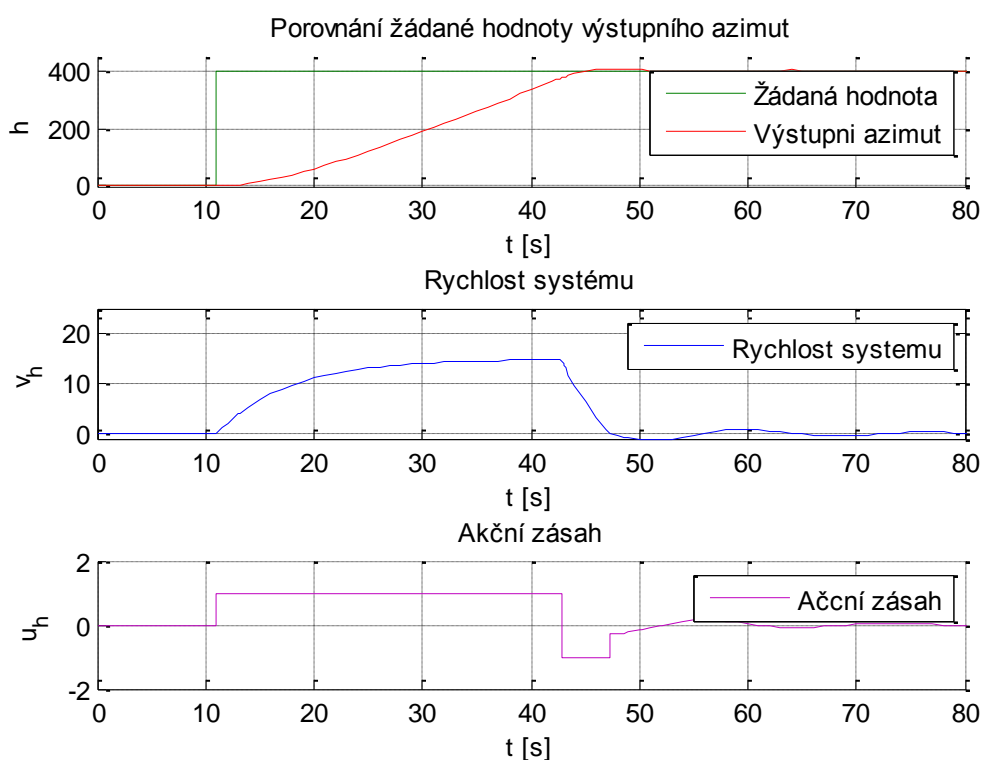
$$\begin{aligned} T &= 14,8 \\ K &= 6,6 \end{aligned} \quad (4-15)$$

Při známé maximální rychlosti a sklonu aproximační přímky optimální trajektorie je známo vše potřebné pro zapojení časově suboptimálního regulátoru.

$$\begin{aligned} k &= -0.454 \\ |U_{SAT}| &= 14.87 \end{aligned} \quad (4-16)$$

4.8.2 Měření regulátoru pro výškový model

Měření regulátoru bylo opět provedeno v matematickém programu Matlab.



Obrázek 4-13: Časově suboptimální regulátor pro výškový model

4.9 Zhodnocení měření

Časově suboptimální regulátor byl odzkoušen pro všechny tři směry pohybu vzducholodě. Zapojení je pro všechny přenosy neměnné. Pro každý přenos vychází jiné konstanty a pro každý

přenos je potřeba odladit přepínací hodnoty, zejména zvolit vhodně pásmo rychlosti a polohy (viz. 4.1).

	Azimut	Ve směru osy X	Výškový model
Konstanty přenosu			
K	22.5	1.35	14.8
T	5	9	6.6
Meze aproximace optimální trajektorie			
$ U_{SAT} $	22.5	1.355	14.87
k_{sm}	-0.767	-0.1419	-0.454
Hodnoty pásmových přepínačů			
v_{pasm}	0.2	0.2	0.2
φ_{pasm}	40	15	25

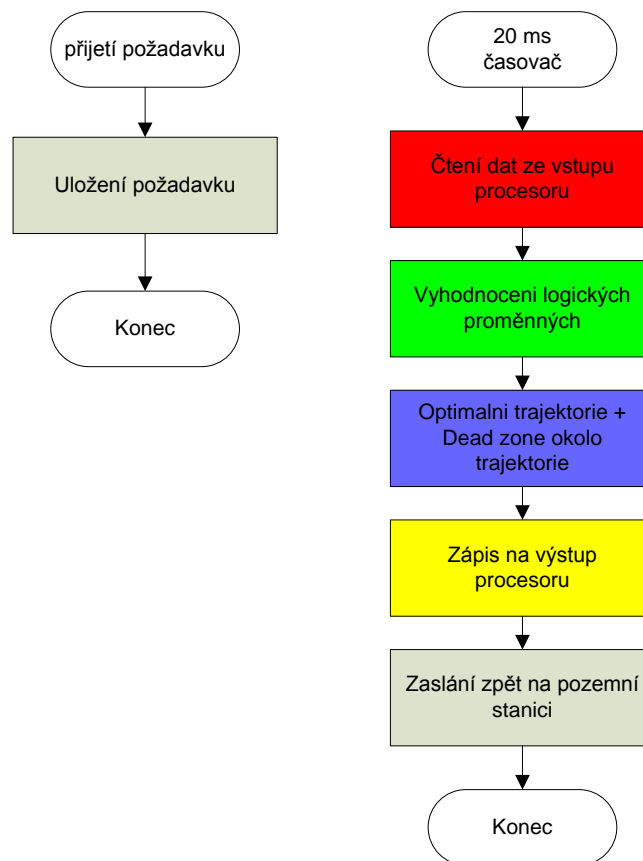
Obrázek 4-14: Konstanty časově suboptimálního regulátoru

Obrázek 4-14 ukazuje hodnoty všech konstant, které je potřeba nastavit pro jednotlivé směry. Konstanty K a T jsou získány vhodným upravením přenosů. Maximální rychlost ($|U_{SAT}|$) potřebná pro aproximaci optimální trajektorie je získána s přechodové charakteristiky přenosu rychlosti. Směrnice aproximace (k_{sm}) je spočtena pomocí tabulkového programu Excel, kdy je spočtena skutečná optimální trajektorie a proložena směrnicí trendu.

Hodnoty pásmových přepínačů jsou nastavovány individuálně pro každý směr pohybu zvlášť. Vypínací rychlost (v_{pasm}) by měla být co nejmenší. Zvolením širokého pásma (v_{pasm}) dojde k předčasnému přepnutí z nelineárního řízení na lineární a lineární regulátor dostává příliš velkou hodnotu odchylky, což způsobuje rozjetí modelu vzducholodě a prodloužení doby ustálení. Pásmo pro polohu musí být nastaveno tak, aby mělo smysl nelineárně řídit. Zvolením malého pásma polohy, zástupný bod B (viz.4.2) nedosáhne trajektorie optimálního řízení a proces brzdění bude vynechán.

4.10 Algoritmus suboptimálního řízení

Celý regulátor je možno jednoduše naprogramovat pomocí procesoru. Algoritmus funguje pro všechny tři směry pohybu vzducholodě. Algoritmus řízení byl navržen a popsán vývojovým blokovým diagramem na obrázku 4-15. Celý algoritmus je obsažen v Příloze B. Vývojový i blokový diagram je jednotný pro všechny tři možné pohyby vzducholodí.



Obrázek 4-15: Blokový diagram suboptimálního řízení

Nejdříve je potřeba přefiltr data z připojených senzorů. Data musí být filtrována a je nutno zaručit jejich správnost. Dále se zjistí hodnota logických proměnných a,b,c.

Model nikdy nebrzdí přesně po trajektorii optimálního řízení, proto je žádoucí vytvořit okolo této trajektorie pásmo necitlivosti, aby nedocházelo k rozkmitání modelu. Pásmo necitlivosti bylo vyřešeno zavedením pomocné proměnné, která určuje stav systému. Pro správnou činnost je nutné pomocnou proměnnou vynulovat při přechodu na lineární řízení, nebo při změně žádané hodnoty.

Dále je potřeba vyhodnotit logické proměnné (viz.4.4). V závislosti na hodnotě logických proměnných se na daný výstup procesoru zapíše akční zásah. Podrobný algoritmus viz.Příloha B. Barva pozadí blokového schématu odpovídá barvě pozadí ve vývojovém diagramu.

Kapitola 5

Ruční řízení modelu

Pro ruční algoritmus časově suboptimální regulaci modifikujeme, jde v podstatě o rychlostní servomechanismus (řízení rychlosti – není uvažován nulový pól).

Požadujeme rozjezd modelu s maximální možnou rychlostí až do dosažení požadované rychlosti zadávané pákovým ovladačem a při požadavku nulové rychlosti maximálním možným brzděním až do dosažení nulové rychlosti. V tomto případě nepoužíváme optimální trajektorii a pohyb zastupujícího bodu ve fázové rovině, ale jedná se pouze o regulační smyčku rychlosti s nelineární částí. Svým chováním připomíná regulaci PD (resp. feedforward). Vstupními daty řízení je požadovaná rychlost pohybu (pákový ovladač) a okamžitá rychlost pohybu modelu.

Celý algoritmus byl rozdělen na dvě části. První část je složená z nelineárního rozjetí modelu a následného lineárního udržování rychlosti. Druhá část je nelineární brzdění.

V první části je ovládací prvek vychýlen z klidové polohy a dochází k rozjetí modelu. Nejdříve maximální možnou rychlostí. Po dosažení hodnoty blízké hodnotě požadované je dále udržována rychlost odpovídající vychýlení pákového ovladače.

Při uvedení pákového ovladače zpět do klidové polohy dojde k otočení akčního zásahu a model začne okamžitě brzdit. Aby model nepřešel do pohybu opačného směru, je při klesnutí rychlosti pod určitou mez přiveden nulový akční zásah a model je zastaven.

Okamžité zastavení modelu je nereálné. Použití ručního regulátoru se podařilo pouze zmenšit dobu ustálení.

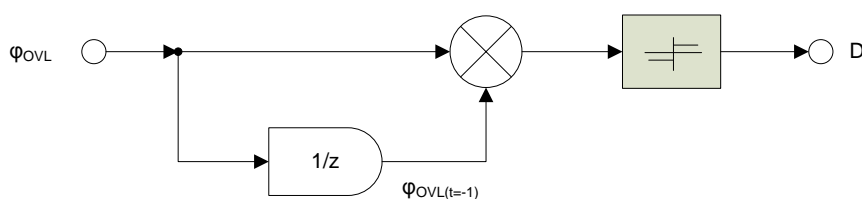
$$\begin{aligned} |\omega_{OVL}| > |\omega_{POV}| &\Rightarrow b_r = \log .1 \\ |\omega_{OVL}| < |\omega_{POV}| &\Rightarrow b_r = \log .0 \end{aligned} \quad (5-2)$$

ω_{POV} mez přivedení nulové akční veličiny

5.2 Vytvoření D-složky

Na požadovanou hodnotu rychlosti je třeba se dostat v co nejkratším čase. Jako nejlepší varianta bylo vybráno vytvoření maximálního akčního zásahu ve směru změny.

Směr D-složky je vždy stejný jako směr změny ovládacího prvku. Nejjednodušší postup je porovnání polohy pákového ovladače v čase změny $\varphi_{OVL(t=0)}$ a polohy před provedením změny $\varphi_{OVL(t=-1)}$.



Obrázek 5-2: Schéma vytvoření D-složky

5.3 Lineární udržování žádané hodnoty

Jakmile se rychlost modelu přiblíží požadované hodnotě, je potřeba přepnout na lineární udržování žádané hodnoty rychlosti. V případě, že by nedošlo k přepnutí, model by pokračoval maximální rychlostí.

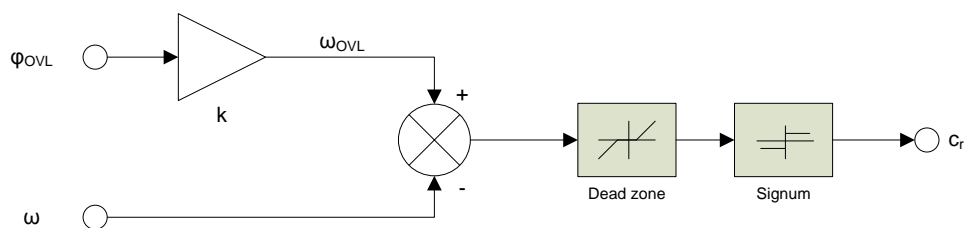
Vychýlení pákového ovladače se přepočítává na rychlost systému. Přepočítání bylo zvoleno lineárně, tudíž se aktuální výchylka násobí převodní konstantou k (viz. Obrázek 5-3).

$$\begin{aligned} \varphi_{OVL\max} &= \omega_{S\max} \\ \varphi_{OVL0} &= \omega_{S0} \\ \varphi_{OVL-\max} &= \omega_{S-\max} \end{aligned} \quad (5-3)$$

φ_{OVL} rychlost modelu

ω_S výchylka ovládacího prvku

Když se žádaná rychlost rovná rychlosti modelu, mělo by dojít k přepnutí na lineární udržování rychlosti. V praxi hrozí nebezpečí vlivem nepřesnosti měření a jiných faktorů, že se sobě obě rychlosti nebudou rovnat. Proto je okolo žádané hodnoty rychlosti vytvořené pásmo necitlivosti, které zaručí přepnutí do lineárního řízení už ve chvíli, kdy se rychlost systému pouze přiblíží hodnotě žádané.



Obrázek 5-3: Vyhodnocení přepnutí na lineární řízení

5.4 Relé

Pro účinné brzdění je potřeba si pamatovat, jakým směrem se model pohyboval v okamžiku před uvedením ovládacího prvku do rovnovážné polohy. Pokud by tato informace systému chyběla, systém by nebyl schopen správně rozhodnout o směru brzdění.

Je žádoucí, aby regulátor vyhodnocoval polohu ovládacího prvku až od odchylky větší než je $|\varphi_{POV}|$. Pro zamezení vyhodnocení uvnitř tohoto pásma bylo použito spínací relé s hysterézí.

5.5 Přepínače

Velikost akčního zásahu na motor je vyhodnocována pomocí přepínačů P_{1R} , P_{2R} a P_{3R} (viz. Obrázek 5-1.). Přepínače jsou řízeny logickým signálem z pásmového přepínače rychlosti (a_r) pásmového přepínače polohy (b_r) a přepínače linearity (c_r).

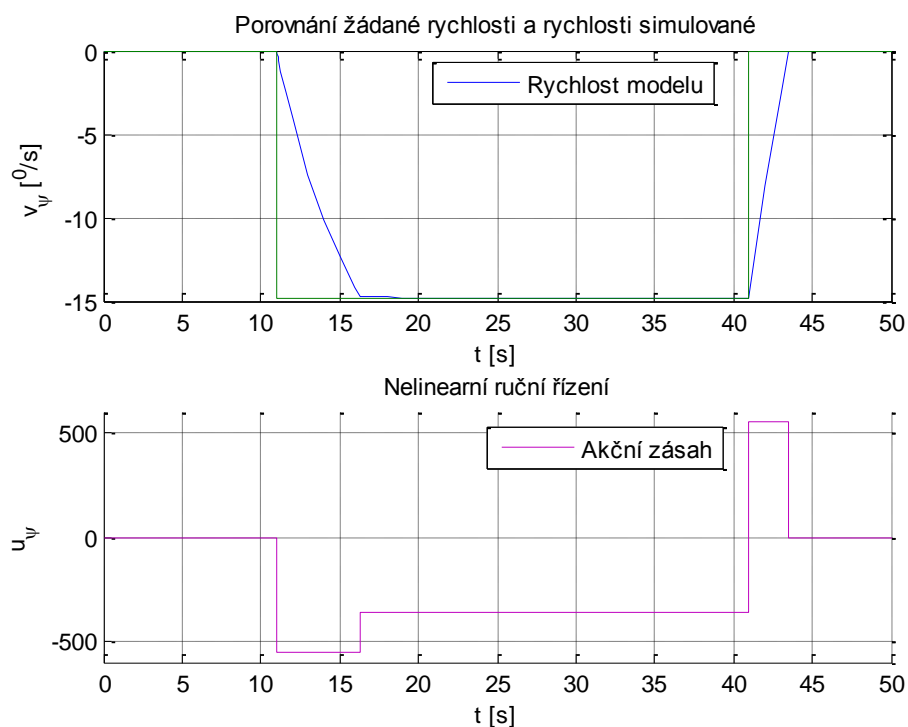
$$\begin{aligned} P_{1R} &= a_r \\ P_{2R} &= b_r \\ P_{3R} &= c_r \end{aligned} \quad (5-4)$$

Přivedení akčního zásahu odpovídající velikosti výchylky ovládacího prvku označíme Z_{1R} . Akční zásah odpovídající D-složce označíme Z_{2R} a nulový akční zásah (ustálený stav) označíme Z_{3R} .

$$\begin{aligned} Z_{1R} &= P_{3R} \bar{P}_{1R} \\ Z_{2R} &= \bar{P}_{3R} \bar{P}_{1R} + \bar{P}_{2R} P_{1R} \\ Z_{3R} &= P_{2R} P_{1R} \end{aligned} \quad (5-5)$$

5.6 Ruční řízení azimutu

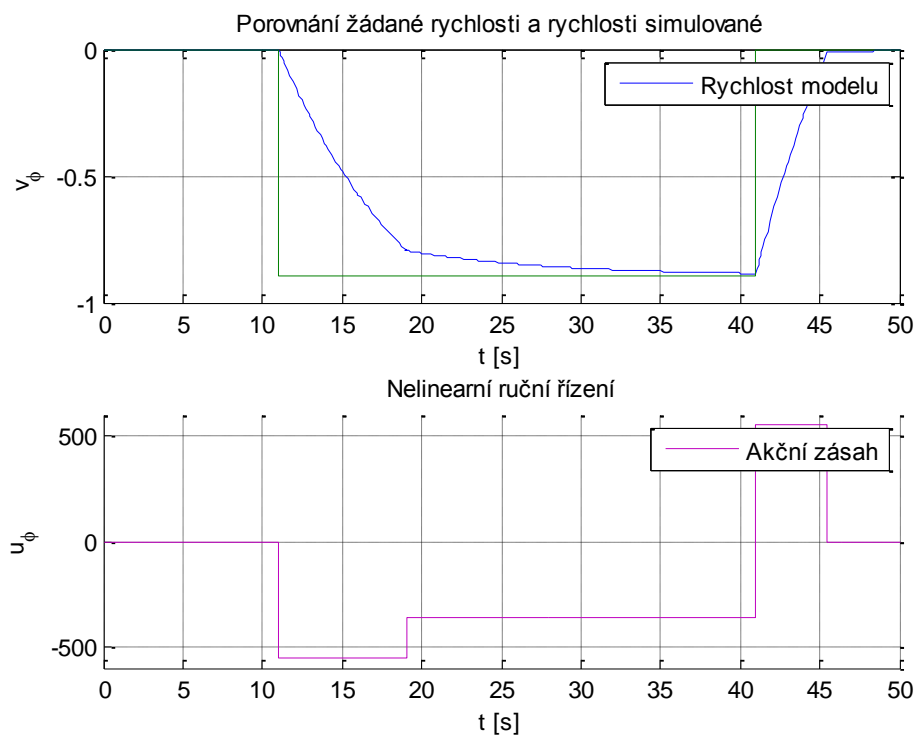
Ruční řízení bylo optimalizováno v matematickém programu Matlab. Přenos systému pro otáčení kolem osy Z je odvozen a popsán v kapitole 3.2.1. Simulinkové schéma i m-file je obsahem příloženého CD.



Obrázek 5-4: Nelineární rychlostní servomechanismus pro azimut

5.7 Ruční řízení pohybu ve směru osy X

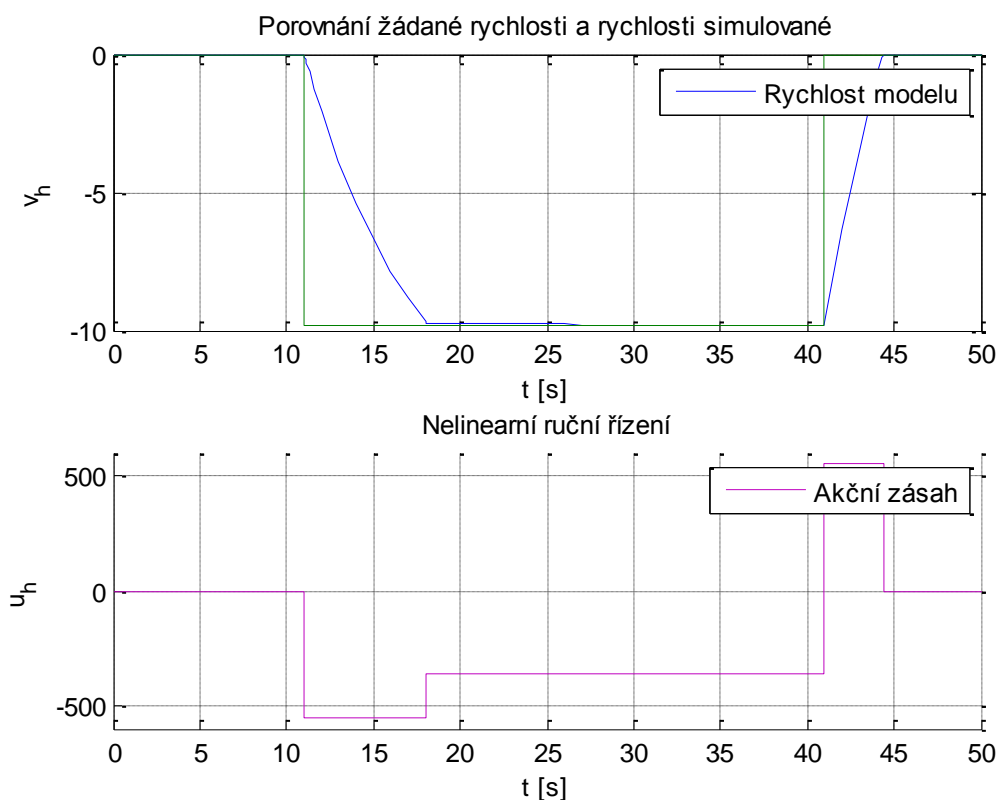
Pomocí zjednodušeného přenosu (viz. 3-9) pohybu ve směru osy X bylo odzkoušeno zapojení pro ruční řízení.



Obrázek 5-5: Nelineární rychlostní servomechanismus pro pohyb ve směru osy X

5.8 Ruční řízení výškového modelu

Posledním směrem pohybu je změna letové hladiny. Implementace tohoto regulátoru bude potřeba zvážit. Pokud bude model stále určený primárně pro pohyb v místnostech, je pravděpodobné, že vzducholoď před tím než dosáhne požadované rychlosti stoupání narazí do stropu místnosti.

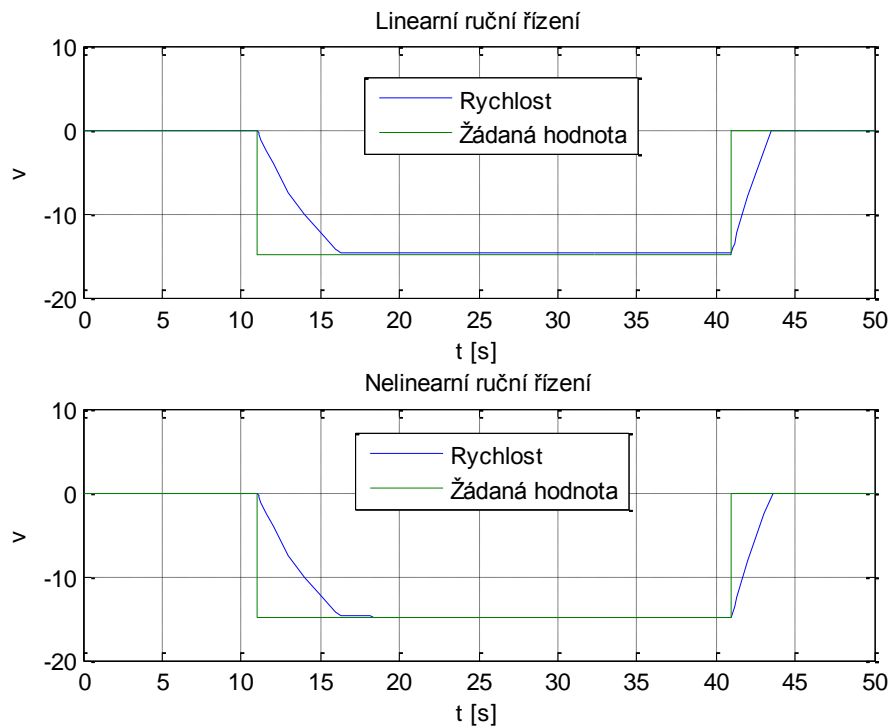


Obrázek 5-6: Nelineární rychlostní servomechanismus pro výškový model

5.9 Zhodnocení rychlostního servomechanismu

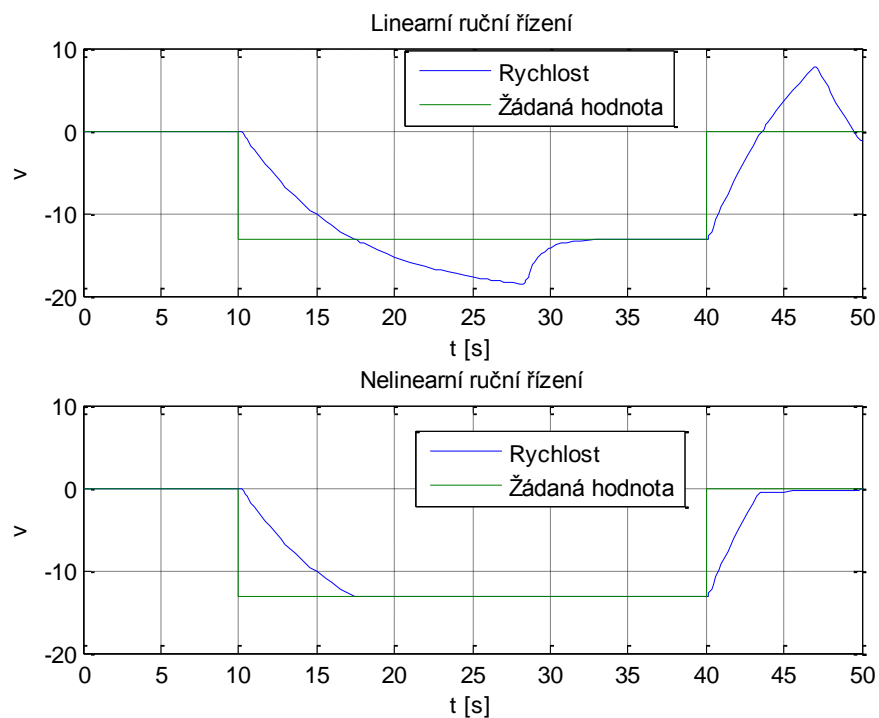
Rychlostní servomechanismus byl navržen univerzálně a funguje pro všechny stabilní přenosy. Jedinou podmínkou je znát maximální rychlost. Z maximální rychlosti systému můžeme spočítat převodní konstantu. Převodní konstanta přepočítává polohu ovládacího prvku na požadovanou rychlost (viz. 5.3). Konstanta se musí počítat pro každý přenos a pro každý typ ovládacího prvku

Při zkoušení v Matlabu se výhoda zapojení nelineárního regulátoru neprojevila. Jelikož jsme pozorovaný systém zjednodušili na první řád. Pro regulaci takového přenosu by stačil P-regulátor (viz Obrázek 5-7). Hodnota $k_p=5$. Model má nenulovou ustálenou odchylku. Ve skutečnosti je model vzducholodi mnohem složitější a dokonce neznámé přesný jeho popis.



Obrázek 5-7: Porovnání lineárního a nelineárního regulátoru rychlosti prvního řádu

V tuto chvíli se dá využít nezávislost rychlostí servomechanismu. Porovnání přenosu druhého řádu s PI regulátorem a přenosu druhého řádu s nelineárním rychlostním servomechanismem. (viz. Obrázek 5-8)



Obrázek 5-8: Porovnání lineárního a nelineárního regulátoru rychlosti druhého řádu

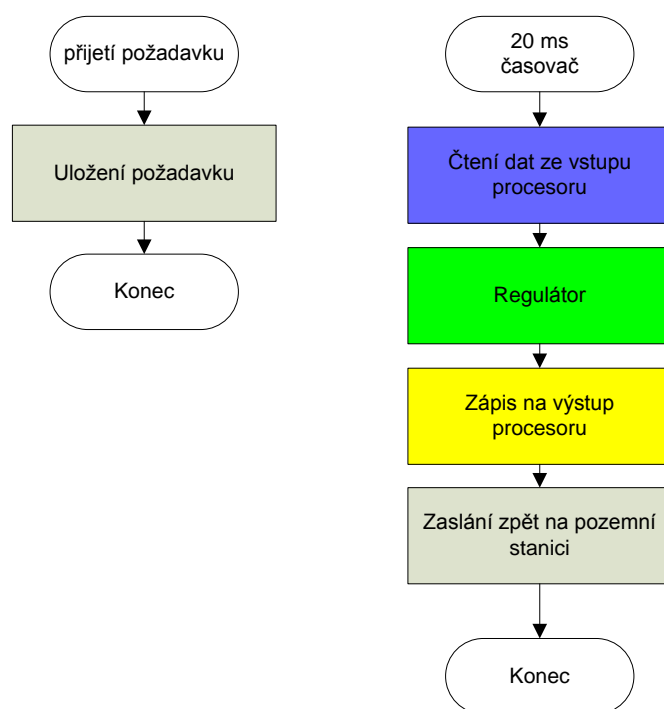
5.10 Algoritmus pro ruční řízení

Na obrázku 5-6 je blokový diagram pro ruční řízení modelu. Algoritmus byl laděn pro procesoru Atmega644. Jako ovládací prvek byl vybrán digitální joystick. Algoritmus je obecně nadefinovaný a funguje pro všechny přenosy.

Algoritmus byl navržen s ohledem na jednoduchost realizace. Požadavek byl splněn, neboť se jedná pouze o přepínání stavů. Postup je velmi snadno realizován pomocí jakéhokoliv procesoru.

Pokud přijde požadavek o změnu, procesor vyhodnotí, zda jde o ruční řízení. Regulátor pracuje s periodou 20ms a reguluje (pokud není požadavek na autonomní řízení) od navázání spojení až do jeho ukončení.

Celý algoritmus ručního řízení je uveden v Příloha C. Barva v blokovém diagramu odpovídá barvě pozadí ve vývojovém diagramu v příloze.

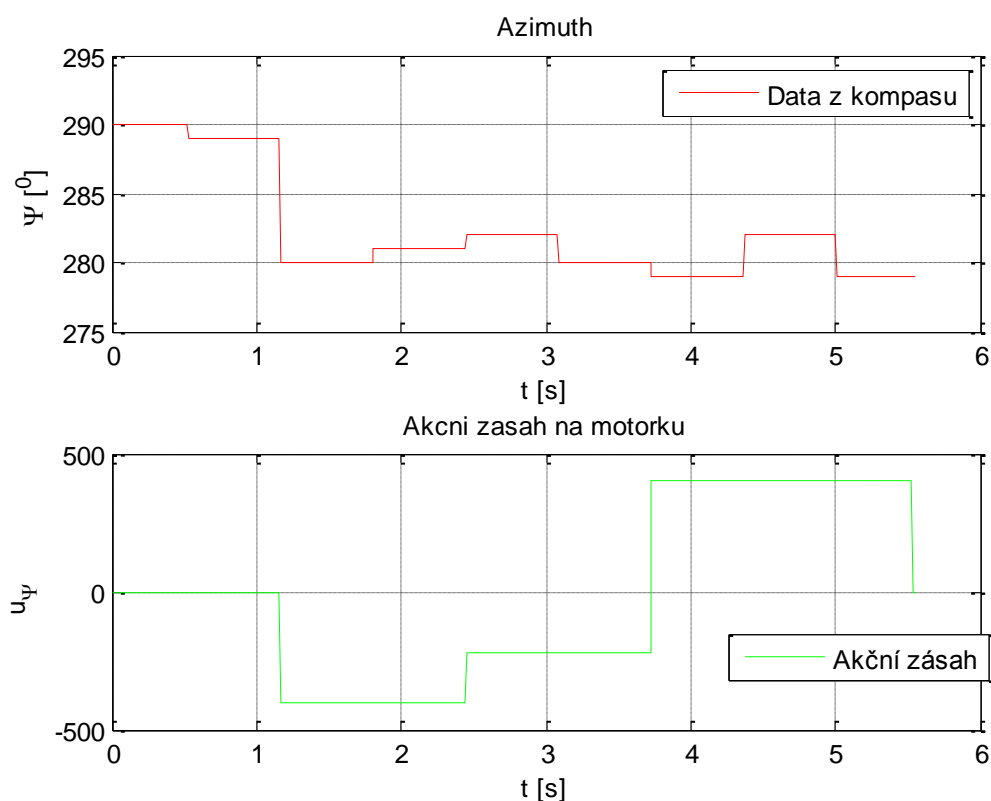


Kapitola 6

Senzorický systém

Celé ověření a měření regulátorů na modelu vzducholoď ztroskotalo na neznalosti rychlosti a polohy měřeného modelu. Pro otáčení kolem osy z byl využíván kompas V2x jenž se ukázal jako nevyhovující. Kompas byl ožiován a kontrolován na desce stolu mimo strojovnu. Při otáčení kompasu na desce stolu docházelo jen k velmi malému výkyvu senzoru do třetí osy, což je předpoklad pro správné fungování dvouosého senzoru. Výkyv ve třetí ose ovlivňoval správnou hodnotu až o 10° . Kompas vykazoval uspokojivé výsledky mimo strojovnu, jelikož byl málo ovlivňován ostatními kovovými předměty, kterých je ve strojovně nespočet.

Poslední chyba a nejfatálnější, je chyba rychlosti měření kompasu. Doba mezi měřeními hodnotami dosahuje dokonce až 0,5s, tj. 2 hodnoty za vteřinu. Procesor posílá požadavek kompasu s periodou 20ms. Pokud nedojde ke změně hodnoty kompasu, zachová se hodnota předchozího měření. Regulátor pracuje se stejnou periodou jako vyčítání ze senzoru. Jelikož nová hodnota je změřena až za 500ms, regulátor pracuje s hodnotou předchozí a to až 20krát. Další měření zapříčiní skokovou změnu azimutu. Při tomto režimu měření hrozí, že požadovaná hodnota bude přeskočena a regulátor na tuto hodnotu zareaguje vysláním špatného akčního zásahu.



Obrázek 6-1: Měření kompasu

Obrázek 6-1 ukazuje průběh dat získaných z kompasu. Data byla ukládána se stejnou periodou jako je perioda regulátoru. Z obrázku je vidět, že hodnota kompasu se mění maximálně dvakrát za vteřinu. Akční zásah na motorku je vyobrazen zelenou čarou a odpovídá nelineárnímu rychlostnímu servomechanismu.

6.1 Kompas

Jako odpovídající senzor pro regulátor je navrhován tříosý kompas HMC6343 (viz. [8]). HMC6343 by měl být schopen kompenzovat naklonění do třetí osy, což je u model pohybujícího se ve vzduchu důležité.

Opakování měření je až 10Hz, což je až 5 krát více než u stávajícího senzoru. V neposlední řadě je možnost využít rozhraní I²C, které je již na modelu implementováno a využíváno pro ultrazvukové senzory. Použitím tohoto rozhraní by jednak došlo k sjednocení používaného rozhraní a jednak by bylo možné dát kompas dále od motorů, které mohou mít neblahý vliv na funkčnost kompasu.

Velikost čipu je 9x9x1 mm s váhou 0,32g. Parametry jsou postačující k využití na vzducholodi, i když je třeba pamatovat, že uváděná hmotnost i rozměry budou větší po vytvoření připojovací desky plošných spojů.

Nevýhodou onoho kompasu je jeho vyšší cena, která se pohybuje okolo \$150 za kus a potřeba vytvořit desku plošných spojů, sloužící pro rozvod signálu k čipu HMC6343.

6.2 Akcelerometry

Pro správné rozhodování regulátoru je potřeba znát okamžitou rychlost systému. Přímé měření rychlosti je prakticky vyloučené. Předpokladem je, že se model pohybuje v uzavřené místnosti bez větru (nebo ho lze zanedbat), tudíž není potřeba dělat korekce snášení modelu vzduchem.

Doporučuji tříosý akcelerometr LIS3LV02DQ (viz. [9]). Senzor disponuje rozhraním I²C a je možné ho připojit ke stávající řídicí desce. Napájení je 2,5V a frekvence měření dosahuje až 40Hz. Tato frekvence je již dostačující. Udávána váha je 0,2g. Cena výrobku je okolo \$45.

Při známém zrychlení není již problém spočítat rychlost pohybu ve všech třech směrech. Integrace sice zavádí určitou chybu při výpočtu, která roste s dobou integrace. Model je navržen pro let v uzavřených prostorech, tudíž se dá předpokládat, že se nebude jednat o dlouhé lety. Při zastavení modelu je možné rychlost vynulovat a začít integrovat znovu, a tím snížíme chybu výpočtu.

6.3 Ultrazvukové dálkoměry

Model je osazen celkem třemi dálkoměry na ultrazvukovém principu. Tyto senzory je výhodné využít jako protikolizní. Například, pokud by se vzducholod' přiblížila příliš k zemi, aby bylo možné další sestup zastavit. Bohužel při rozjezdu se model vychyluje do všech stran.

Současně s touto prací je na katedře vyvíjena stabilizační plošinka. Plošinka bude umístěna na servomechanismech. Řídicí jednotka plošinky bude zpracovávat data z gyroskopu a může kompenzovat výkyvy vzducholodě.

Umístěním dálkoměru na tuto stabilizační plošinku, zajistíme jeho konstantní směřování v žadaném směru

Kapitola 7

Závěr

V této práci byly experimentálně určeny přenosy modelu pro všechny tři možné směry pohybu vzducholodi. Určené přenosy byly porovnány s výsledky dosaženými matematickým odvozením. Pro otáčení kolem osy z a pro výškový model byly stanoveny přenosy druhého řádu. Pro tyto pohyby lze využít teoretického odvození fázové roviny. Pro pohyb ve směru osy x byl stanoven přenos třetího řádu. Při úvaze přenos třetího řádu je potřeba modifikovat zapojení na řízení podle fázového prostoru. Složitost celého regulátoru by se výrazně zvětšila, proto bylo rozhodnuto aproximovat přenos třetího řádu řádem druhým. Chyba způsobená tímto postupem je následně vykompenzována v lineární části řízení, které je navrženo pro třetí řád.

Hlavním úkolem, bylo navržení regulátoru pro let vzducholodě v prostoru s ohledem na její vlastnosti. Návrh časově suboptimálního regulátoru odpovídal teoretickému předpokladu. K nelineárnímu regulátoru byl přidán lineární regulátor, aby systém měl co nejmenší ustálenou odchylku.

Pro účely nelineárního řízení rychlosti při ručním řízení ovládání modelu byl suboptimální regulátor modifikován. Celý proces byl nasimulován v matematickém programu. Výsledkem bylo konstatování rychlejšího dosažení požadované rychlosti a mnohem rychlejšího zastavení.

Na skutečném modelu proběhly praktické experimenty, které potvrdili výsledky dosažené v simulaci. Stálá implementace se nezdařila, z důvodu špatných dat ze senzorů.

Tato bakalářská práce se zabývala nezávislým pohybem ve všech třech směrech. Azimut, jež je řízen vlastním motorkem, je zcela nezávislý na ostatních dvou (za předpokladu, že se obě vrtule na hřídeli točí ve stejném směru) směrech pohybu. Pohyb vpřed a změna letové hladiny je řízena přes stejné motorky (motorky na hřídeli).

Při žádosti pohybu ve směru osy x a zároveň žádosti o změnu letové hladiny dochází k problému, neboť oba dva směry jsou řízeny stejným akčním členem. Pro výsledný pohyb bude nutné použít vektorový rozklad pohybu do jednotlivých os. Tento vektorový rozklad bude fungovat pro lineární řízení. Pro časově nelineární suboptimální řízení však pohyb v jednotlivých osách končí v různém čase, což způsobí nerovnoměrný pohyb v ose s delší dobou řízení.

Vektorový rozklad sám o sobě nepůjde, jelikož ten bude fungovat pouze pro lineární řízení. Pokud dojde k této situaci, bude potřeba daný směr rozložit.

Jako jedna varianta se nabízí nelineární změnu letové hladiny zanedbat a měnit výšku pouze natáčením hřídele při pohybu vpřed. Nelineární řízení by bylo využito pouze pro kolmý vzlet (tj. požadavek dopředu nulový)

Další možností je vytvořit rozhodovací algoritmus, který bude rozhodovat, který ze směrů bude řízen lineárně a který nelineárně.

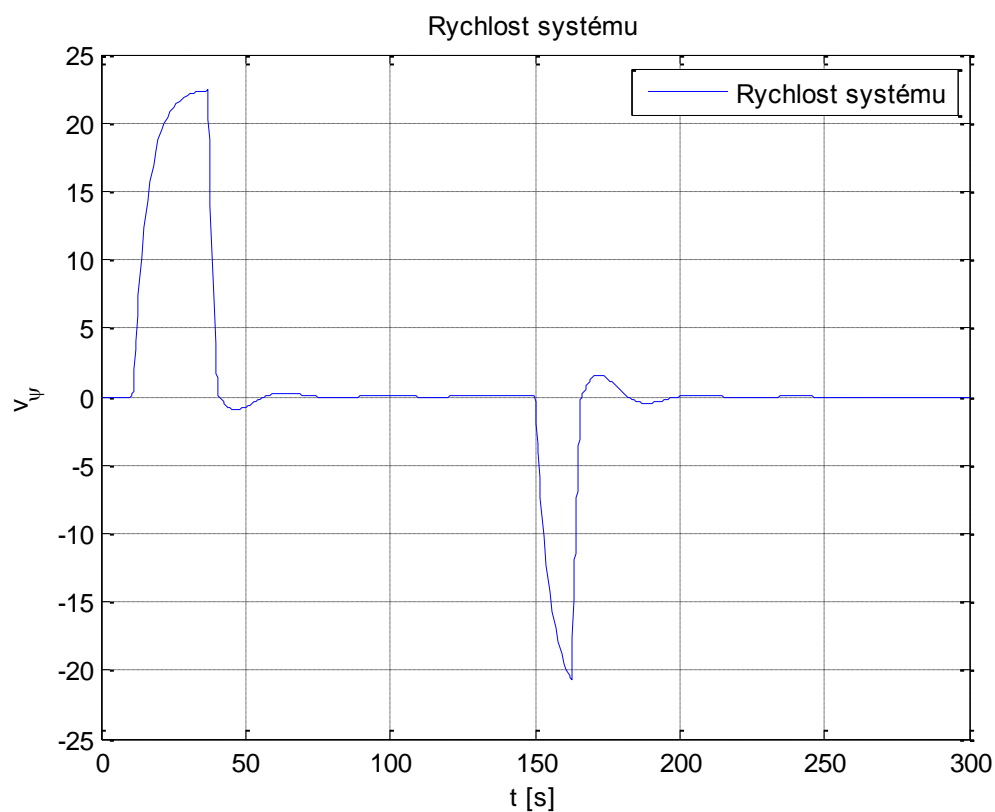
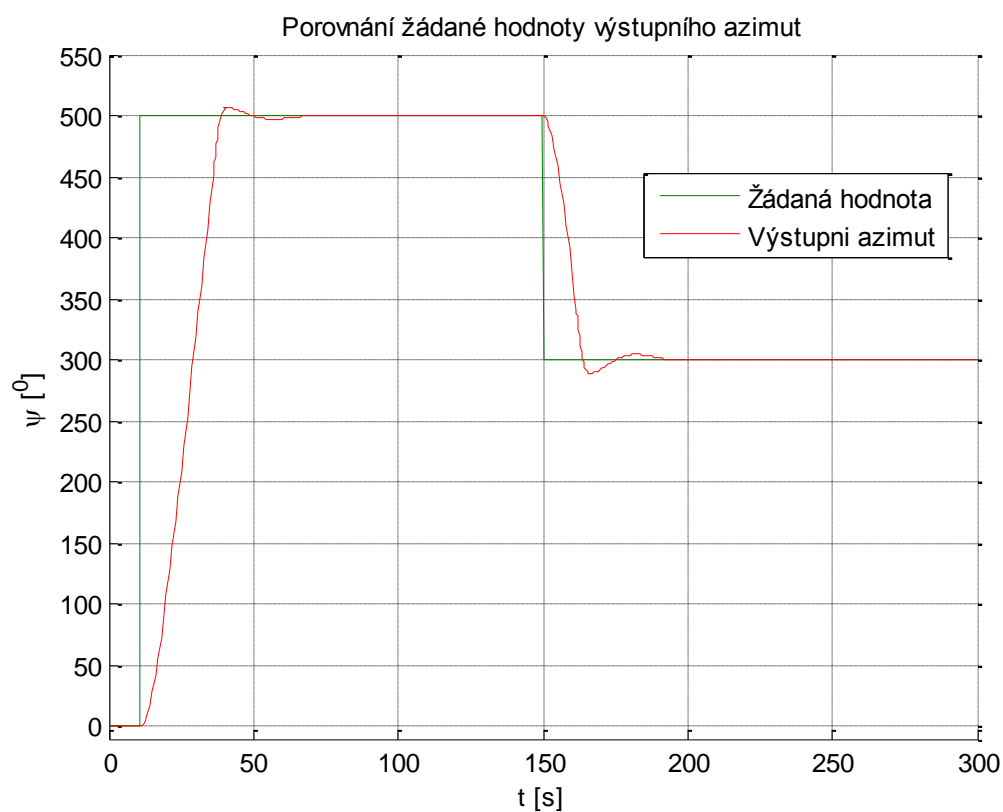
Pro oba případy platí, že se model v jednom směru nedostane do žádané polohy v nejkratším čase.

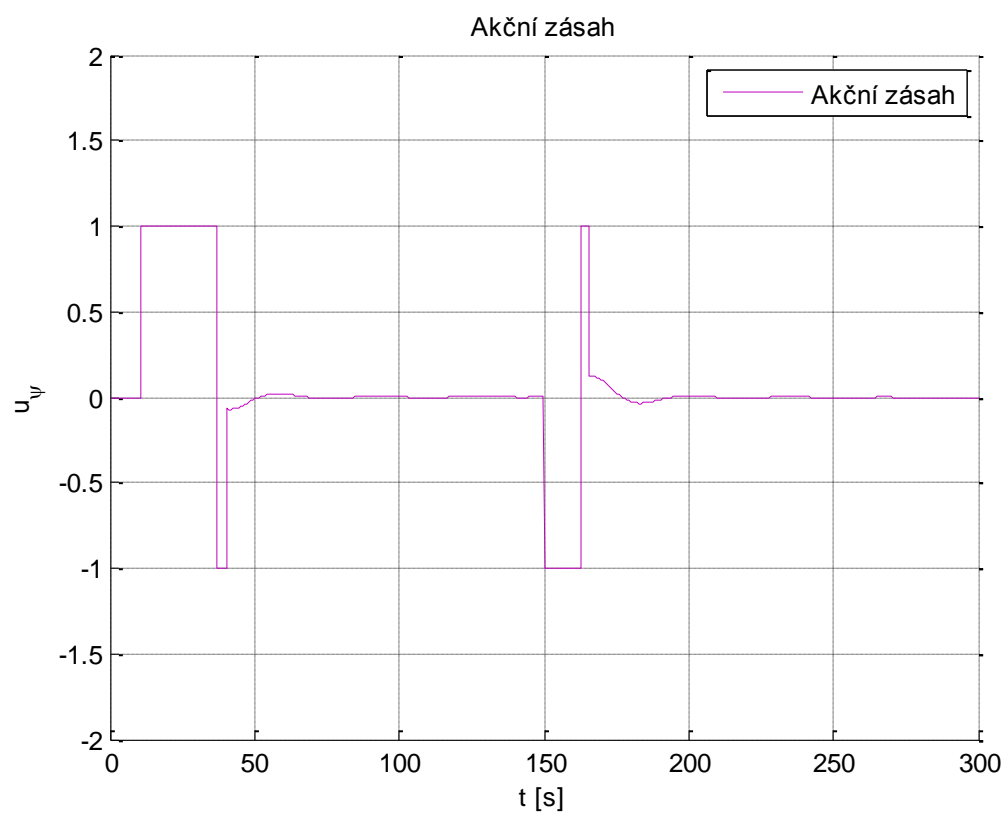
Literatura

- [1] Müller, M. *Vzducholod' – orientace v prostoru*, 2008. FEL ČVUT, Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. J. Bayer, CSc.
- [2] Bittner, J. *Vzducholod' – základní řízení*, 2009. FEL ČVUT, Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. J. Bayer, CSc.
- [3] Noskovič, P. *Modelování a identifikace systémů*, 1999. Montanex a.s., Ostrava, ISBN 80-7225-030-2
- [4] Kirchmann, B., Sůva, S., *Teorie řízení III*, 1989. Ediční středisko ČVUT, Praha
- [5] Kotek, Z., *Nelineární regulace a servomechanismy*, 1966, Státní nakladatelství technické literatury, Praha
- [6] Katalogové listy Atmel (2008). [online], dostupný na:
< <http://www.avrfreaks.net/> >
- [7] Katalogové listy kompasu V2Xe (2008). [online], dostupný na:
< <http://www.atmel.com/products/avr/default.asp> >
- [8] Katalogové listy HMC6343. [online], dostupný na
< <http://www.sparkfun.com/> >
- [9] Katalogové listy LIS3LV02DQ. [online], dostupný na
< <http://www.sparkfun.com/> >

Příloha A.

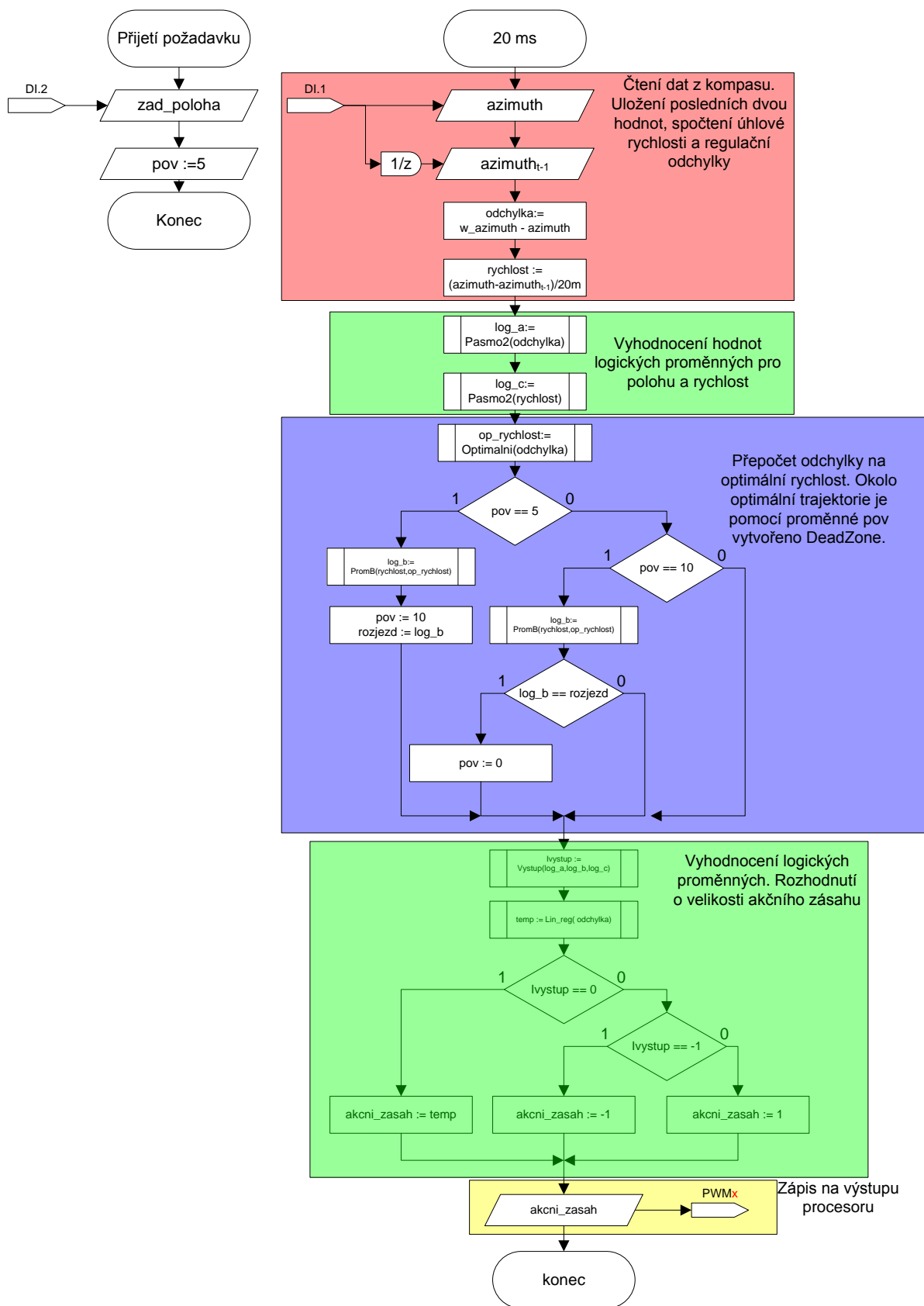
Signály suboptimální regulace s PI regulátorem





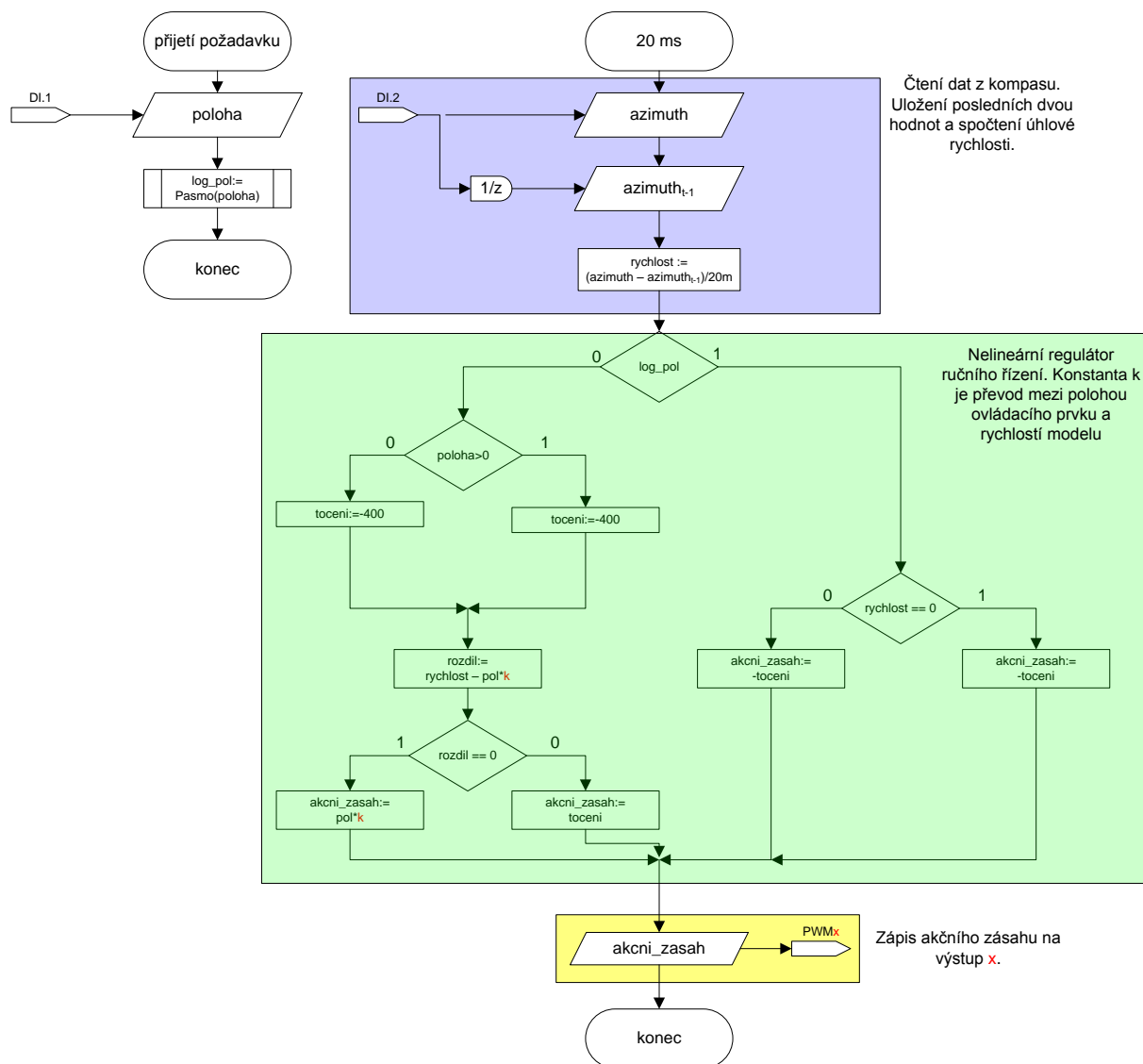
Příloha B.

Algoritmus suboptimálního regulátoru



Příloha C.

Algoritmus ručního řízení

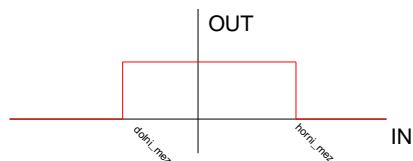


Příloha D.

Popis použitých funkcí ve vývojovém diagramu

- Funkce pasmo: Vyhodnocuje, zda hodnota leží v určitém intervalu*

```
bool Pasma(float horni_mez, float dolni_mez, float hodnota){
    if(hodnota < horni_mez && hodnota > dolni_mez){
        return 1;
    }
    return 0;
}
```



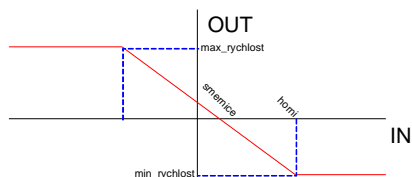
- Funkce Pasma2: Stejně jako Pasma. Vrací pouze opačné hodnoty*

```
bool Pasma(float horni_mez, float dolni_mez, float hodnota){
    if(hodnota < horni_mez && hodnota > dolni_mez){
        return 0;
    }
    return 1;
}
```



- Funkce optimalni: Přepočítává aktuální odchylku na optimální rychlost, podle předem známe optimální trajektorie*

```
float Optimalni(float max_rychlost, float min_rychlost, float smernice, float odchylka){
    float dolni = min_rychlost*smernice;
    float horni = max_rychlost*smernice;
    if(odchylka < horni & odchylka > dolni){
        return smernice*odchylka
    }
    if(odchylka < horni){
        return max_rychlost;
    }
    return min_rychlost
}
```



- Funkce Prom_B : Zjišťuje v jaké polorovině se nachází zástupný bod*

```
float Prom_B(float rychlost, float optimalni){
    float rozdil = rychlost + optimalni
    if(rozdil > 0){
        return 0;
    }
    return 1;
}
```



Příloha E.

Ukázka části zdrojového kódu pro autonomní řízení azimutu

```
if(reg_azm) {
    //regulacni zasah
    odchylka = w_azimuth - azimuth[5];
    logika_a = Pasm2(-20,20,odchylka);
    logika_c = Pasm2(-3,3,r_rozdil_azimutu);
    optimalni_rychlost = Optimalni(4,-4,-0.767, odchylka);
    logika_b = PromennaB(r_rozdil_azimutu,optimalni_rychlost/400);
    if( citani < 5){
        logika_b = PromennaB(r_rozdil_azimutu, optimalni_rychlost);
        smer_prvni = logika_b;
        citani = 10;
    }
    if(logika_b == smer_prvni){
        logika_b = PromennaB(r_rozdil_azimutu,optimalni_rychlost);
    }
    IVystup = Vystup(logika_a,logika_b,logika_c,p2);
    temp = LinearniRegulator(odchylka, azimuth[4]-azimuth[6]);
    if(IVystup == 0){
        r_akcni_zasah = temp;
        write16OCR1B(WHL+r_akcni_zasah);
    }else{
        if(IVystup == 1){
            r_akcni_zasah = 400;
            write16OCR1B(WHL+r_akcni_zasah);
        }else{
            r_akcni_zasah = -400;
            write16OCR1B(WHL+r_akcni_zasah);
        }
    }
}
```

Příloha F.

Zdrojový kód pro ruční řízení azimutu

```
if(poloha == 0){
    if(azimut_motor > 0){
        tocení = 400;
    }else{
        tocení = -400;
    }
    chyba = km*r_rozdíl_azimutu - kn*azimut_motor;
    r_chyba = Pasm(-30,30,chyba);
    if(r_chyba == 0){
        if(povolení2==0){
            r_akční_zasah = tocení;
        }else{
            r_akční_zasah = azimut_motor;
        }
    }else{
        povolení2=1;
        r_akční_zasah = azimut_motor;
    }
    write16OCR1B(WHL+r_akční_zasah);
    povolení=1;
}else{
    r_rychlost = Pasm(-3,3, r_rozdíl_azimutu);
    if(r_rychlost == 1){
        temp = 0;
        r_akční_zasah = temp;
        write16OCR1B(WHL+r_akční_zasah);
        povolení = 0;
    }else{
        if(povolení == 1){
            r_akční_zasah = -tocení;
            write16OCR1B(WHL+r_akční_zasah);
        }
    }
    povolení2=0;
}
```

Příloha G.

Obsah přiloženého CD

- ❖ Soubor ***bp.pdf***: bakalářská práce ve formátu pdf
- ❖ Soubor ***airship.exe***: modifikované ovládání vzducholodi, pro účely měření regulátorů
- ❖ Adresář ***AVR***: zdrojový program pro procesor Atmega 644
- ❖ Adresář ***C#***: zdrojový program řídicího systému vzducholodě
- ❖ Adresář ***Fotodokumentace***: fotografie vzducholodě a komponent
- ❖ Adresář ***Matlab***: soubory a schémata pro program Matlab
- ❖ Adresář ***Schémata***: bloková schémata ve programu Visio 2003