

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘÍCÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍZENÍ MODELU HELIKOPTÉRY

BAKALÁRSKA PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

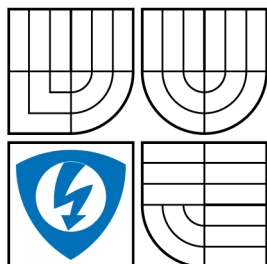
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

IVAN ŠTEFANISKO

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘÍCÍ TECHNIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍZENÍ MODELU HELIKOPTÉRY HELICOPTER MODEL CONTROL

BAKALÁRSKA PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

IVAN ŠTEFANISKO

VEDÚCI PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ POHL,

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Ivan Štefanisko

ID: 138952

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Řízení modelu helikoptéry

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se současným stavem laboratorní úlohy "Řízení modelu helikoptéry".

Proveďte modernizaci hardwaru jednotlivých komponent helikoptéry. Prozkoumejte možnosti řízení modelu pomocí platformy Compact RIO.

Sestavte laboratorní úlohy na řízení a identifikaci pro vybrané předměty bakalářského a magisterského studia.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Vavřín, P. : Teorie dynamických systémů, VUT, Brno 1989

Isermann, R., Munchhof, M. : Identification of Dynamic Systems

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 27.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pohl

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

V tejto práci sa na úvod zoznámime s existujúcim modelom helikoptéry pre výuku dynamických systémov. Neskôr preskúmame jednotlivé možnosti riadenia modelu a navrhujeme laboratórne úlohy pre vybrané predmety bakalárskeho a magisterského štúdia. Pri zoznamovaní sa s modelom helikoptéry opíšeme hardvérové časti a popíšeme teoretický matematický model. K samotnému návrhu riadenia prikróčíme až po tom, ako vytvoríme jednotlivé podprogramy zamerané na získavanie uhlu natočenia ramien, pulzne-šírkovú moduláciu k ovládaniu otáčok motora či vytvorenie samotného regulátora. Riadenie navrhujeme metódou Ziegler-Nicholsa a metódou frekvenčných charakteristík. Samotné laboratórne úlohy budeme tvoriť s ohľadom na obsah vyučovaných predmetov bakalárskeho a magisterského štúdia.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

CompactRIO, FPGA modul, real-time modul, inkrementálny enkóder, pulzne-šírková modulácia, PID regulácia, identifikácia systému

ABSTRACT

In this paper we will introduce the existing model of a helicopter for teaching dynamic systems. Later, we will explore various control options of a model, and design laboratory tasks for the selected subject for bachelor's and master's study. In becoming acquainted with the model of a helicopter we describe hardware parts and the theoretical mathematical model. We can design controls after we have created a subprograms aimed at raising the rotational angle arms, pulse-width modulation to control the motor speed or creation itself control. The control methods we propose are the Ziegler-Nichols and frequency characteristics. The actual laboratory tasks will be formed with respect to the content of subjects taught bachelor's and master's study.

KEYWORDS

Compact RIO, FPGA modul, real-time modul, incremental encoder, pulse-width modulation, PID control, system identification

ŠTEFANISKO, Ivan *Řízení modelu helikoptéry*: bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2013. 55 s. Vedúci práce bol Ing. Lukáš Pohl,

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému „Řízení modelu helikoptéry“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., o autorskom práve a o právach súvisiacich s právom autorským, a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. dielu 4 Trestného zákoníka č. 40/2009 Sb.

Brno

.....
(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Lukáši Pohlovi za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy na realizáciu práce.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Zoznam obrázkov	8
Úvod	9
1 Model helikoptéry	10
1.1 Fyzikálny popis	10
1.1.1 Bloková schéma zapojenia helikoptéry	10
1.2 Matematický popis	11
2 Platforma CompactRIO	17
2.1 Čo je to CompactRIO	17
2.2 Vývojové prostredie LabVIEW	17
2.2.1 LabVIEW Real-time Modul	17
2.2.2 LabVIEW FPGA Modul	18
2.2.3 Prepojenie Real-time modulu s FPGA modulom	18
3 Hardvérové vybavenie	19
3.1 Kontrolér	19
3.2 C moduly	19
3.2.1 Polohovací modul NI 9505	19
3.2.2 Digitálny vstupno/výstupný modul NI 9401	20
3.3 Motory	20
3.4 Rotačný inkrementálny snímač	21
3.5 Napájací zdroj	22
4 Tvorba programu	23
4.1 Enkóder	23
4.2 PWM modulácia	25
4.3 Krížová väzba	27
4.4 Identifikácia systému	28
4.4.1 Identifikačný nástroj MATLABu	28
4.4.2 Postup identifikácie	29
4.5 Regulátory	33
4.5.1 PID regulátor	33
4.5.2 Číslicový PID regulátor	34
4.5.3 Vytvorenie PID regulátora	34
4.6 Polohová slučka	36
4.7 Návrh regulátora	36

4.7.1	Návrh regulátora pomocou metódy Zieglera a Nicholosa	37
4.7.2	Analýza pomocou frekvenčnej charakteristiky	39
4.8	Wind-up jav	44
4.8.1	Eliminácia Wind-up javu	44
5	Návrh laboratórnej úlohy	45
5.1	Zadanie	45
5.2	Vypracovanie	46
	Záver	47
	Literatúra	49
	Zoznam veličín	51
	Zoznam skratiek	52
A	Fotodokumentácia	53
A.1	Reálny model helikoptéry	53
B	Užívateľské prostredie	54
B.1	Kalibrácia	54
B.2	Identifikácia	54
B.3	Riadenie	55

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Bloková schéma zapojenia modelu helikoptéry.	10
1.2	Gravitačné sily zodpovedajúce momentu v rovnovážnej polohe modelu.	11
1.3	Moment sily a trenia zodpovedajúci podmienkam modelu helikoptéry.	13
1.4	Momenty síl v horizontálnej rovine (pri pohľade zhora).	15
1.5	Bloková schéma pre rovnice 1.33 a 1.34	16
2.1	Znážorneie prepojenia Real-time modulu s FPGA modulom.	18
3.1	NI cRIO-9076	19
3.2	NI cRIO-9505	19
3.3	NI cRIO-9401	20
3.4	ROBBE 400/45 [10]	20
4.1	Fázový posuv dvoch kanálov enkóderu.	23
4.2	Enkóder vytvorený v programe LabVIEW.	24
4.3	Programové prostredie určené ku kalibrácii uhlov modelu helikoptéry.	24
4.4	Zarovnanie PWM modulácie.	25
4.5	PWM modulácia vytvorená v programe LabVIEW.	26
4.6	Krížová väzba medzi rovinou elevácie a azimutu.	27
4.7	Identifikačný nástroj v MATLABe.	29
4.8	Zobrazenie vstupného a výstupného signálu pre identifikáciu.	30
4.9	Vstupno-výstupné dáta F11.	31
4.10	Vstupno-výstupné dáta F12.	31
4.11	Vstupno-výstupné dáta F21.	32
4.12	Vstupno-výstupné dáta F_{azim}	32
4.13	Nami vytvorený PID regulátor.	35
4.14	Algoritmus polohovej slučky.	36
4.15	Grafické zobrazenie zmeny požadovaného uhlu elevácie pri navrhnutí regulátore pomocou metódy Zieglera a Nicholosa.	38
4.16	Grafické zobrazenie zmeny požadovaného uhlu azimutu pri navrhnutí regulátore pomocou metódy Zieglera a Nicholosa.	39
4.17	Typová amplitúdová logaritmická frekvenčná charakteristika [13].	40
4.18	Bodeho diagram pre regulátor roviny elevácie.	42
4.19	Bodeho diagram pre regulátor roviny azimutu.	42
4.20	Grafické zobrazenie zmeny požadovaného uhlu elevácie pri navrhnutí regulátore pomocou metódy frekvenčných charakteristík.	43
4.21	Grafické zobrazenie zmeny požadovaného uhlu azimutu pri navrhnutí regulátore pomocou metódy frekvenčných charakteristík.	43
A.1	Reálny model helikoptéry.	53

ÚVOD

Táto práca sa zaoberá vytvorením modelu helikoptéry pre účely výuky dynamických systémov. Vytváranie modelu daného systému je snaha napodobniť reálny systém s čo najväčšiou zhodou parametrov. Modely existujú v rôznych formách. Môžeme ich vytvárať pomocou matematických rovníc či simuláciami v najrôznejších počítačových programoch. Môžeme taktiež zhotoviť konštrukčný fyzikálny model v zmenšenej alebo skutočnej veľkosti. Aj keď sú metódy návrhu a samotné prevedenie dnešnej doby veľmi sofistikované, je potrebné uvedomiť si, že stále je to snaha napodobniť skutočný fyzikálny systém.

Táto bakalárska práca je pokračovaním semestrálneho projektu, v ktorom sme sa zoznamovali so samotným modelom helikoptéry a jeho teoretickým matematickým popisom. Preskúmala sa hardvérová platforma CompactRIO a vývojové programovacie prostredie LabVIEW. Ďalej bude práca rozšírená o vytvorenie riadenia modelu helikoptéry a návrh laboratórnych úloh.

V úvodných kapitolách bude opísaný model helikoptéry a hardvérová platforma CompactRIO s grafickým vývojovým prostredím LabVIEW. V ďalších kapitolách budú tvorené časti programu pre ovládanie modelu. Po spojení týchto častí vznikne funkčný celok, ktorý dokáže ovládať rýchlosť krútenia vrtúľ a zobrazovať uhol naklonenia/natočenia modelu. K vytvoreniu riadenia bude vyžívaný naprogramovaný algoritmus PID regulátora, kde regulačné konštanty budú navrhnuté pomocou metódy Ziegler-Nicholsa a metódou frekvenčných charakteristík na základe získaných prenosov z identifikačného nástroja.

Návrh laboratórnych úloh bude zohľadňovať obsah vyučovaného učiva v bakalárskom i magisterskom štúdiu. K vytvorenému návrhu bude vypracované vzorové riešenie navrhnutých úloh.

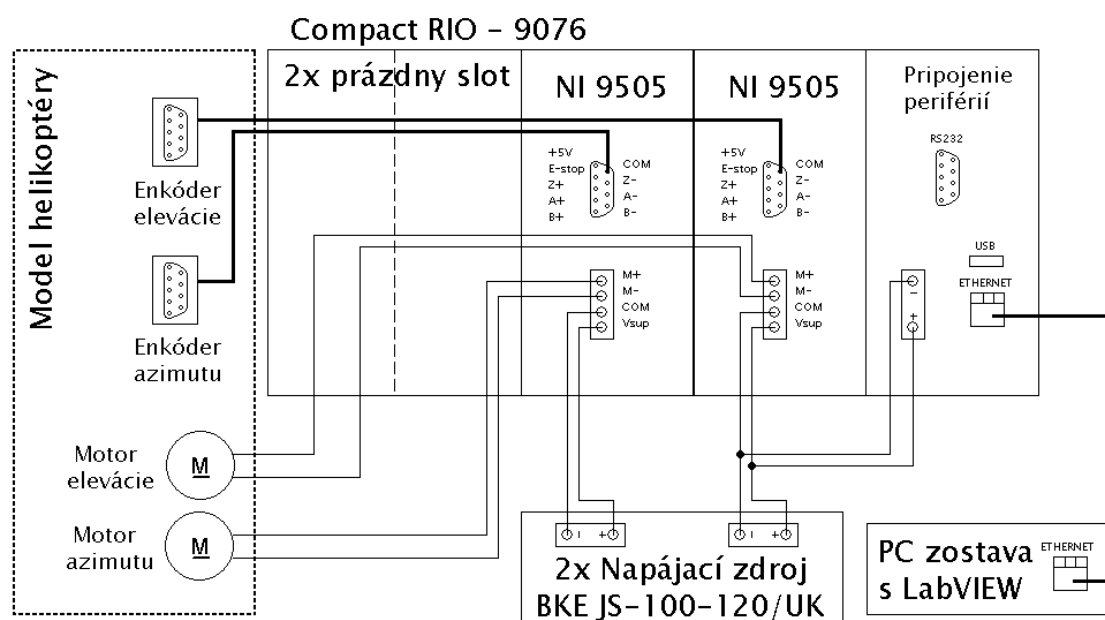
1 MODEL HELIKOPTÉRY

1.1 Fyzikálny popis

Model helikoptéry pozostáva z masívneho podstavca a na ňom pripevneného ramena s tyčou, čo reprezentuje telo helikoptéry. Na oboch koncoch tyče sú umiestnené dva jednosmerné motory s permanentným magnetom reprezentujúce hlavný a vedľajší pohon. Rameno s tyčou majú dva stupne voľnosti (elevácia a azimut), ktoré je možné meniť rotáciou vrtúľ. Uhol natočenia v rovine elevácie a azimut je snímaný enkóderom a následne pomocou algoritmu v programe prevádzkaný na stupne. Otáčky motorov (vrtúľ) sú nastavované pomocou generovania PWM (pulzno-šírková modulácia).

Na základe predošlého popisu je zjavné, že sa jedná o MIMO (multi input, multi output) systém s dvoma vstupmi (hlavný a vedľajší motor) a dvoma výstupmi (poloha modelu v rovine elevácie a azimutu). Model helikoptéry je mechanický systém riadený pomocou platformy CompactRIO a pripojeného osobného počítača s vytvoreným programom pre riadenie modelu.

1.1.1 Bloková schéma zapojenia helikoptéry



Obr. 1.1: Bloková schéma zapojenia modelu helikoptéry.

1.2 Matematický popis

Matematický popis [1] aerodynamického systému podobného helikoptéru je vytvorený na základe niektorých zjednodušených predpokladov. Po prvé sa predpokladá, že dynamiku vrtule subsystému je možné opísať diferenciálnou rovnicou. Ďalej predpokladáme, že trenie systému je viskózne. Predpokladá sa, že podsystém vrtule môžeme opísať v súlade s prietokovou teóriou.

Vyššie uvedené predpoklady nám umožňujú definovať systém jednoznačne. Ďalej môžeme zväziť rotáciu ramena vo zvislej rovine tj. okolo vodorovnej osi. Za predpokladu, že hnacie momenty sú produkované vrtulou, rotácia môže byť opísaná ako pohyb kyvadla.

Z druhého Newtonovho zákona pohybu dostaneme:

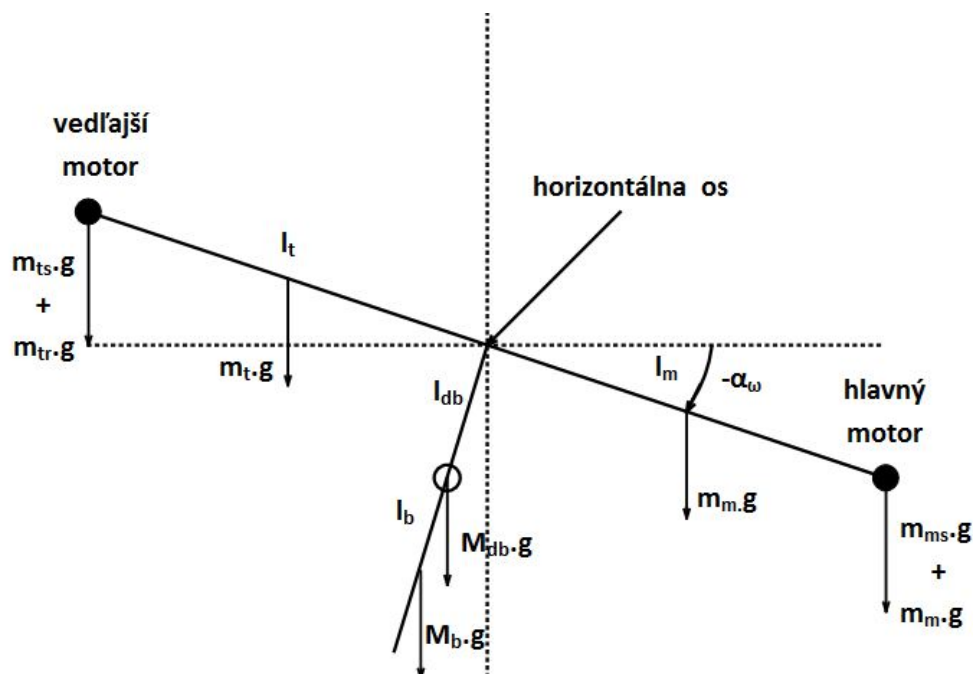
$$M_v = J_v \frac{d^2 \alpha_v}{dt^2} \quad [\text{N.m}] \quad (1.1)$$

M_v - celkový moment vo vertikálnej rovine $[\text{N.m}]$

J_v - súčet momentov zotrvačnosti vzhľadom k horizontálnej osi $[\text{kg.m}^2]$

α_v - uhol naklonenia nosníka (výška) $[\text{°}]$

Otáčaním modelu okolo vodorovnej osi zistíme moment za pôsobenia gravitácie:



Obr. 1.2: Gravitačné sily zodpovedajúce momentu v rovnovážnej polohe modelu.

$$M_{vl} = g \left\{ \left[\left(\frac{m_t}{2} + m_{tr} + m_{ts} \right) l_t - \left(\frac{m_t}{2} + m_{mr} + m_{ms} \right) l_m \right] \cos \alpha_v - \left(\frac{m_b}{2} l_b + m_{cb} l_{cb} \right) \sin \alpha_v \right\} \quad [\text{N.m}] \quad (1.2)$$

v zjednodušenom tvare je to potom :

$$M_{vl} = g \left\{ [A - B] \cos \alpha_v - C \sin \alpha_v \right\} \quad [\text{N.m}] \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} kde : \quad A &= \left(\frac{m_t}{2} + m_{tr} + m_{ts} \right) l_t \\ B &= \left(\frac{m_t}{2} + m_{mr} + m_{ms} \right) l_m \\ C &= \left(\frac{m_b}{2} l_b + m_{cb} l_{cb} \right) \end{aligned}$$

M_{v1} -krútiaci moment zodpovedajúci sile gravitácie $[\text{N.m}]$

m_{mr} -hmotnosť hlavného DC motoru s rotorom $[\text{kg}]$

m_m -hmotnosť hlavnej časti nosníka $[\text{kg}]$

m_{tr} -hmotnosť vedľajšieho DC motoru s rotorom $[\text{kg}]$

m_t -hmotnosť vedľajšej časti nosníka $[\text{kg}]$

m_{cb} -hmotnosť protizávažia $[\text{kg}]$

m_b -hmotnosť protizávažia ramena $[\text{kg}]$

m_{ms} -hmotnosť hlavného štítu $[\text{kg}]$

m_{ts} -hmotnosť vedľajšieho štítu $[\text{kg}]$

l_m -dĺžka hlavnej časti nosníka $[\text{m}]$

l_t -dĺžka vedľajšej časti nosníka $[\text{m}]$

l_b -dĺžka protizávažia nosníka $[\text{m}]$

l_{cb} -dĺžka protizávažia nosníka od kĺbu otáčania $[\text{m}]$

g -gravitačné zrýchlenie $[\text{m.s}^{-2}]$

Pôsobením hnacej sily hlavného motoru získame moment:

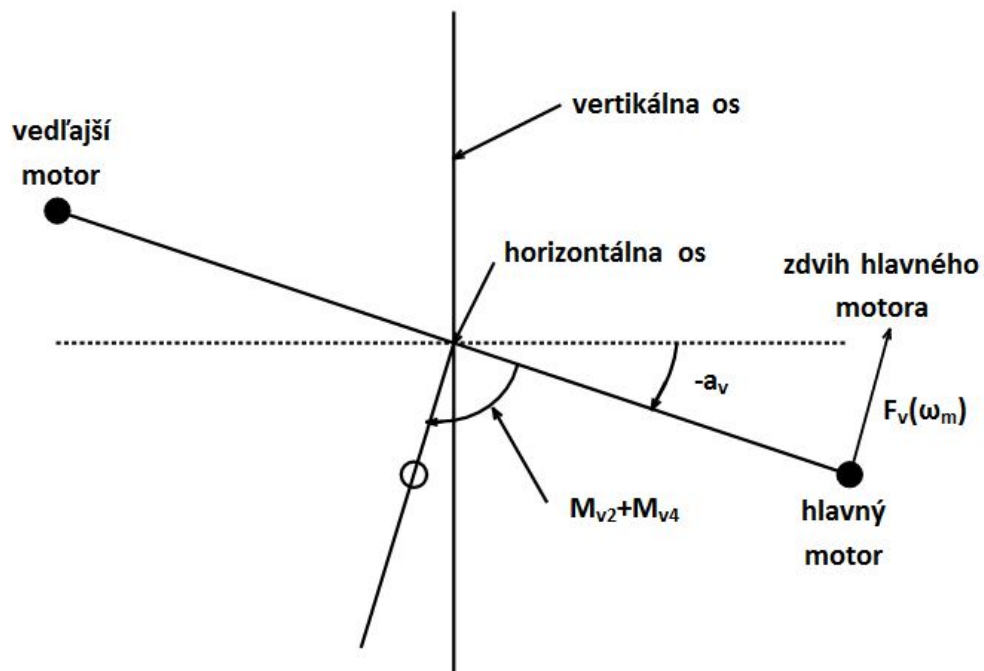
$$M_{v2} = l_m F_v(\omega_m) \quad [\text{N.m}] \quad (1.4)$$

M_{v2} -moment hnacej sily tvorený hlavným motorom $[\text{N.m}]$

$F_v(\omega_m)$ -závislosť hnacej sily na uhlovej rýchlosti $[\text{N.s/rad}]$

ω_m -uhlová rýchlosť hlavného motora $[\text{rad.s}^{-1}]$

$$M_{v3} = -\Omega_h^2 (A + B + C) \sin \alpha_v \cos \alpha_v \quad [\text{N.m}] \quad (1.5)$$



Obr. 1.3: Moment sily a trenia zodpovedajúci podmienkam modelu helikoptéry.

$$\begin{aligned}
 \text{kde :} \quad A &= \left(\frac{m_t}{2} + m_{tr} + m_{ts} \right) l_t \\
 B &= \left(\frac{m_t}{2} + m_{mr} + m_{ms} \right) l_m \\
 C &= \left(\frac{m_b}{2} l_b + m_{cb} l_{cb} \right)
 \end{aligned}$$

M_{v3} -moment odstredivých síl zodpovedajúci zvislej ose [N.m]

$$\Omega_h = \frac{d\alpha_h}{dt} \quad [\text{rad.s}^{-1}] \quad (1.6)$$

Ω_h -uhlová rýchlosť okolo zvislej osi [rad.s⁻¹]

α_h -uhol natočenia nosníka v horizontálnej rovine [°]

$$M_{v4} = -\Omega_v k_v \quad [\text{N.m}] \quad (1.7)$$

M_{v4} -moment trenia závislý na uhlovej rýchlosti nosníka okolo horizontálnej osi [N.m]

kde:

$$\Omega_v = \frac{d\alpha_v}{dt} \quad [\text{rad.s}^{-1}] \quad (1.8)$$

Ω_v -uhlová rýchlosť okolo vodorovnej osi [rad.s⁻¹]

k_v -trecia konštanta [-]

Môžeme stanoviť moment zotrvačnosti k vodorovnej osi, ktorý nie je závislý na polohe nosníka.

$$J_{v1} = m_{mr} l_m^2 \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.9)$$

$$J_{v2} = m_m \frac{l_m^2}{3} \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.10)$$

$$J_{v3} = m_{cb} l_{cb}^2 \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.11)$$

$$J_{v4} = m_b \frac{l_b^2}{3} \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.12)$$

$$J_{v5} = m_{tr} l_t^2 \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.13)$$

$$J_{v6} = m_t \frac{l_t^2}{3} \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.14)$$

$$J_{v7} = \frac{m_{ms}}{2} r_{ms}^2 + m_{ms} l_m^2 \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.15)$$

$$J_{v8} = m_{ts} r_{ts}^2 + m_{ts} l_t^2 \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.16)$$

r_{ms} -polomer hlavného krytu $[\text{m}]$

r_{ts} -polomer vedľajšieho krytu $[\text{m}]$

Rovnakým spôsobom je možné opísať pohyb nosníka okolo zvislej osi ak predpokladáme, že hnacie momenty sú produkované rotorom a momentom zotrvačnosti závislom na uhle natočenia. Horizontálny pohyb nosníka okolo zvislej osi môže byť opísaný ako pohyb hmotného bodu.

$$M_h = J_h \frac{d^2 \alpha_h}{dt^2} \quad [\text{N.m}] \quad (1.17)$$

M_h -celkový moment v horizontálnej rovine $[\text{N.m}]$

J_h -súčet momentov zotrvačnosti vzhľadom k zvislej osi $[\text{kg.m}^2]$

α_h -uhol naklonenia nosníka (výchylka) $[\text{°}]$

Otáčaním modelu okolo vodorovnej osi zistíme moment za pôsobenia gravitácie:

$$M_{h1} = l_t F_h(\omega_t) \cos \alpha_v \quad [\text{N.m}] \quad (1.18)$$

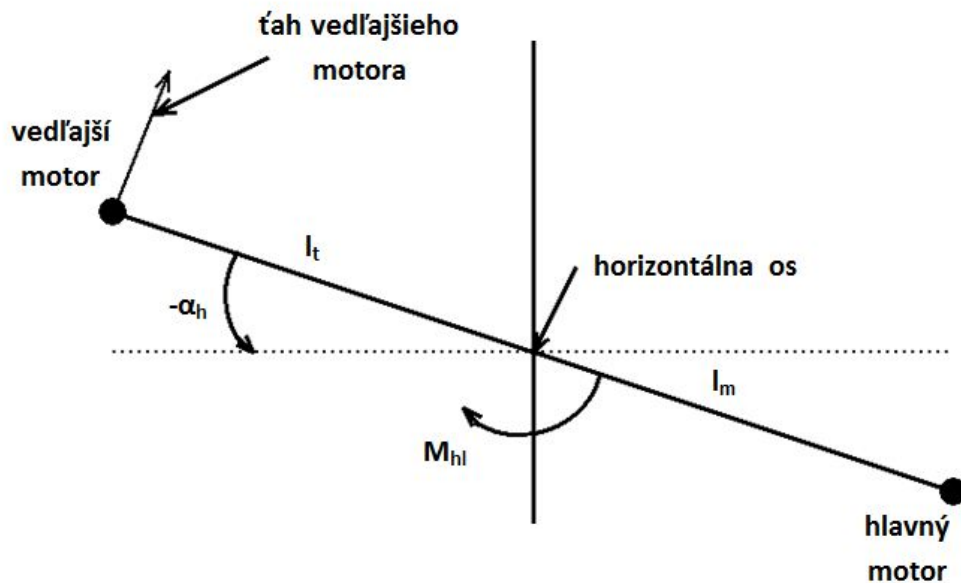
ω_m -uhlová rýchlosť vedľajšieho motora $[\text{rad.s}^{-1}]$

$F_h(\omega_t)$ -závislosť hnacej sily na uhlovej rýchlosti vedľajšieho motora $[\text{N.s/rad}]$

$$M_{h2} = -\Omega_h k_h \quad [\text{N.m}] \quad (1.19)$$

M_{h2} -moment trenia závislý na uhlovej rýchlosti nosníka okolo zvislej osi $[\text{N.m}]$

k_h -trečia konštanta $[-]$



Obr. 1.4: Momenty síl v horizontálnej rovine (pri pohľade zhora).

Môžeme stanoviť komponenty momentu zotrvačnosti k zvislej osi, v závislosti na stúpaní nosníka.

$$J_{h1} = \frac{m_m}{3} (l_m \cos \alpha_v)^2 \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.20)$$

$$J_{h2} = \frac{m_t}{3} (l_t \cos \alpha_v)^2 \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.21)$$

$$J_{h3} = \frac{m_b}{3} (l_b \cos \alpha_v)^2 \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.22)$$

$$J_{h4} = m_{tr} (l_t \cos \alpha_v)^2 \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.23)$$

$$J_{h5} = m_{mr} (l_m \cos \alpha_v)^2 \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.24)$$

$$J_{h6} = m_{cb} (l_{cb} \cos \alpha_v)^2 \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.25)$$

$$J_{h7} = \frac{m_{ts}}{2} r_{ts}^2 + m_{ts} (l_t \cos \alpha_v)^2 \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.26)$$

$$J_{h8} = m_{ms} r_{ms}^2 + m_{ms} (l_m \cos \alpha_v)^2 \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.27)$$

alebo v skrátrenom tvare:

$$J_h = D \cos^2 \alpha_v + E \sin^2 \alpha_v + F \quad [\text{kg.m}^2] \quad (1.28)$$

kde D,E,F sú konštanty:

$$D = \frac{m_b}{3} l_b^2 + m_{cb} l_{cb}^2$$

$$E = \left(\frac{m_m}{3} + m_{mr} + m_{ms} \right) l_m^2 + \left(\frac{m_t}{3} + m_{tr} + m_{ts} \right) l_t^2$$

$$F = m_{ms} r_{ms}^2 + \frac{m_{ts}}{2} r_{ts}^2$$

Použitím rovníc (1.1),(1.6),(1.8) a (1.17) môžeme napísať rovnice popisujúce systém nasledovne:

$$\begin{aligned} \frac{dS_v}{dt} = & \frac{l_m F_v(\omega_m) - \Omega_v k_v + g((A - B) \cos \alpha_v - C \sin \alpha_v)}{J_v} - \\ & - \frac{\Omega_h^2 (A + B + C) \sin 2\alpha_v}{J_v} \end{aligned} \quad (1.29)$$

$$\frac{d\alpha_v}{dt} = \omega_v = S_v + \frac{J_{tr}\omega_t}{J_v} \quad (1.30)$$

$$\frac{dS_h}{dt} = \frac{l_t F_h(\omega_t) \cos \alpha_v - \Omega_h k_h}{J_h} = \frac{l_t F_h(\omega_t) \cos \alpha_v - \Omega_h k_h}{D \sin^2 \alpha_v + E \cos^2 \alpha_v + F} \quad (1.31)$$

$$\frac{d\alpha_h}{dt} = \omega_h = S_h + \frac{J_{mr}\omega_m \cos \alpha_v}{J_h} = S_h + \frac{J_{mr}\omega_m \cos \alpha_v}{D \sin^2 \alpha_v + E \cos^2 \alpha_v + F} \quad (1.32)$$

J_{tr} -moment zotrvačnosti hlavnej vrtule [kg.m²]

J_{mr} -moment zotrvačnosti vedľajšej vrtule [kg.m²]

S_v -moment hybnosti vo vertikálnej rovine [kg.m².s⁻¹]

S_h -moment hybnosti v horizontálnej rovine [kg.m².s⁻¹]

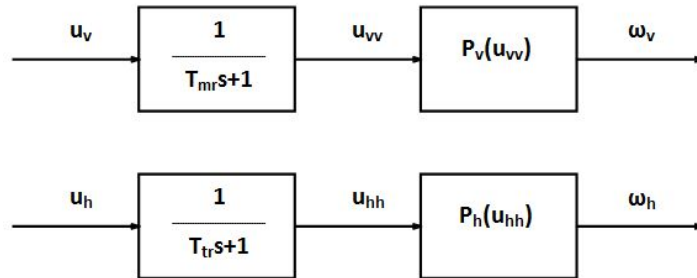
Je potrebné poznamenať, že uhlová rýchlosť je nelineárna funkcia vstupného napätia jednosmerného motora. Preto máme ďalšie dve rovnice:

$$\frac{du_{vv}}{dt} = \frac{1}{T_{mr}}(-u_{vv} + u_v) \quad \omega_m = P_v(u_{vv}) \quad (1.33)$$

$$\frac{du_{hh}}{dt} = \frac{1}{T_{tr}}(-u_{hh} + u_h) \quad \omega_t = P_h(u_{hh}) \quad (1.34)$$

T_{mr} -časová konštanta hlavného motora [s]

T_{tr} -časová konštanta vedľajšieho motora [s]



Obr. 1.5: Bloková schéma pre rovnice 1.33 a 1.34

2 PLATFORMA COMPACTRIO

2.1 Čo je to CompactRIO

CompactRIO [8] je konfigurovateľné zariadenie pre riadenie systémov a zber dát. Systém sa skladá z vloženého procesora pre komunikáciu a spracovávanie dát, z konfigurovateľných šasi, užívateľsky programovateľného poľa FPGA, vymeniteľných vstupných či výstupných modulov a graficky programovateľného softvéru LabVIEW, ktorý pracuje v reálnom čase.

2.2 Vývojové prostredie LabVIEW

Program budeme vytvárať pomocou LabVIEW [8], čo je grafické vývojové prostredie s konfiguračne založenými nástrojmi a vysokou programovou kompatibilitou pre rozvoj meraní, analýzy a kontroly aplikácií. Programové prostredie je tvorené grafickými ovládacími a zobrazovacími prvkami, ktoré sú určené pre prepojenie užívateľa s vytvoreným grafickým kódom vykonávajúcim naprogramované funkcie. Tieto funkcie tvoríme vkladaním jednotlivých programových prvkov zo širokej palety výberu, ktoré navzájom prepájame. K dispozícii máme najrôznejšie funkcie pracujúce s numerickými, boolinovskými či textovými hodnotami. Ďalej existujú funkcie pracujúce s časom, digitálnym či analógovým signálom, identifikáciou, riadením, meraním, analýzou, vykresľovaním, prácou s poliami, štruktúrami alebo užívateľsky vytvorenými dátovými typmi. Programovanie má dva hlavné rozhrania opísané v nasledujúcich podkapitolách.

2.2.1 LabVIEW Real-time Modul

Prvým rozhraním je programové prostredie pre vývoj aplikácií pracujúcich v reálnom čase (z anglického RTOS - real time operation system [7]). To znamená, že pracuje ako operačný systém, ktorý je zodpovedný za riadenie hardvérových prostriedkov a činnosť hostujúcich aplikácií v presne definovaných časových úsekoch. Tieto časové úseky majú možnosť dvoch priorít. V jednom prípade musia byť kritické operácie vykonané do presne stanoveného časového intervalu a nie je možné tento časový interval predbehnúť, či prekročiť (odvodené z anglického hard real-time). V druhom prípade je možné kritické operácie vykonávať v intervale, ktorý predstavuje časový úsek, v ktorom je možné operáciu vykonať (odvodené z anglického soft real-time). Jeho výhodou je deterministické a spoľahlivé vyvíjanie aplikácií širokého zamerania bez časových oneskorení. K použitiu programovacieho real-time modulu je potrebné zariadenie s operačným systémom reálneho času, čo je v našom prípade platforma

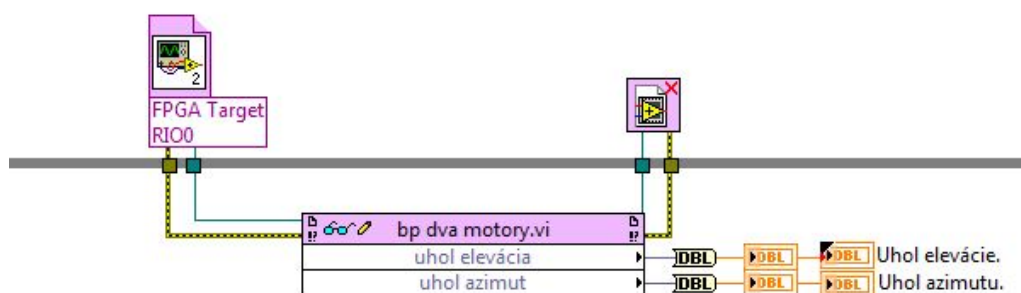
CompactRIO. Za zmienku stojí i rýchlosť kompilácie, ktorá je v porovnaní s FPGA modulom oveľa kratšia (Príklad kompilácie aplikácie modelu helikoptéry: real-time modul - 9 sekúnd, FPGA modul - 25 minút.).

2.2.2 LabVIEW FPGA Modul

Druhým rozhraním je vývojové prostredie pracujúce na rovnakom princípe ako predchádzajúci real-time modul, s tým rozdielom, že vytvorený program je po kompilácii nahrávaný priamo do FPGA konfigurovateľného hradlového poľa zabudovaného v platforme CompactRIO. Veľká nevýhoda je časovo náročné prekladanie vytvoreného kódu pri kompilácii do strojového tvaru požadovaného FPGA čipom. Výhodou je nenávisťnosť na operačný systém, ktorá umožňuje rýchlejšie, presnejšie a spoľahlivejšie spracovávanie a vyhodnocovanie dát.

2.2.3 Prepojenie Real-time modulu s FPGA modulom

Prepojenie real-time modulu s FPGA modulom je tvorené pomocou naprogramovania tunelu v real-time module. Jeho úlohou je otvorenie FPGA kódu, čítanie dát, zápis dát a uzatvorenie otvoreného FPGA kódu. Naprogramovanie tunelu je vytvorené vložením programových blokov, ktoré sú k tomu určené a vzájomným prepojením jednotlivých blokov. K čítaniu a zápisu hodnôt z FPGA modulu je potrebné zadať, ktorá hodnota z FPGA modulu vôbec bude používaná a akým spôsobom.



Obr. 2.1: Znážorneie prepojenia Real-time modulu s FPGA modulom.

3 HARDVÉROVÉ VYBAVENIE

3.1 Kontrolér

NI cRIO-9076 [4] je integrovaný systém kombinujúci kontrolér pracujúci v reálnom čase a konfigurovateľné hradlové pole FPGA, pre kontrolu a monitorovanie aplikácií.

Táto základná doska obsahuje:

- 400 MHz priemyselný real-time procesor pre riadenie, záznam dát a analýzu
- Štyri sloty LX45 pre C moduly
- Rozsah prevádzkových teplôt -20 až 55° C
- 10/100BASE-T Ethernet port, USB 2.0 port, a sériový port RS232 pre pripojenie k periférií
- Napájacie napätie v rozsahu 9-30 V
- Malé rozmery vhodné pre aplikácie OEM s množstvom odpočtov



Obr. 3.1: NI cRIO-9076

3.2 C moduly

3.2.1 Polohovací modul NI 9505

NI 9505 [5] modul série C, pre platformu NI Compact RIO, je plný H mostík pre priame pripojenie k akčným členom ako jednosmerné servo pohony, relé, lampy, solenoidy a ventily. V module je vstavané rozhranie enkóderu použiteľné na jednočinný koniec alebo diferenciálne vstupy. Navracia pozíciu z kvadratického enkóderu. Modul tiež obsahuje prúdový senzor k vzorkovaniu a filtrácii prúdu pretekajúceho pohonom. Zobrazenie veľkosti prúdu je možné v konfigurovateľnom programovacom výstupe FPGA. V kombinácii s FPGA môžeme vytvárať inteligentné a výkonné riadiace systémy. NI 9505 dokáže dávať stály prúd o hodnote až 5A pri teplote 40° C.



Obr. 3.2: NI cRIO-9505

3.2.2 Digitálny vstupno/výstupný modul NI 9401

NI 9401 [6] je osem kanálový vstupno/výstupný modul s rýchlosťou 100 ns. Patrí do série C pre platformu NI Compact RIO alebo CompactDAQ. Definícia digitálnych portov pre vstup alebo výstup prebieha pomocou „nibble“, čo predstavujú štyri bity. K nastaveniu vstupov a výstupov máme tri možnosti:

- 8 digitálnych vstupov
- 8 digitálnych výstupov
- 4 digitálne vstupy a 4 digitálne výstupy

S konfigurovateľnou vstupno/výstupnou technológiou môžeme model použiť pre implementáciu vysokorýchlostných čítačov, časovačov, digitálnych komunikačných protokolov či generáciu pulzov. Každý kanál je kompatibilný s 5 V/TTL signálovou logikou.



Obr. 3.3: NI cRIO-9401

3.3 Motory

Pre hlavný motor je použitý jednosmerný motor ROBBE 400/45 [10] s permanentnými magnetmi, určený predovšetkým pre modelárske modely, kde je vyžadovaná malá hmotnosť a nízka spotreba energie. V našom prípade je napájanie prevádzané pomocou spínacieho zdroja (viď kapitola 3.5). Tento motor je vhodný pre riadenie modelu v rovine elevácie. Ako vedľajší motor pre riadenie roviny azimutu je použitý motor neznámych parametrov. Avšak na základe experimentálnych skúšok môžeme skonštatovať, že motor bude mať podobné parametre ako hlavný motor.

Technické parametre motoru:

- Napájacie napätie 4,8-8,4 V
- Nominálne napájacie napätie 7,2 V
- Maximálna rýchlosť 15 000 ot/min
- Maximálny prípustný prúd 9 A
- Prúd pri maximálnej účinnosti 4 A
- Prikon 50 W
- Maximálna účinnosť 67%
- Priemer hriadeľa 2,3 mm
- Približná hmotnosť 71 g
- Približná dĺžka 38 mm
- Približná šírka 28 mm



Obr. 3.4: ROBBE 400/45 [10]

3.4 Rotačný inkrementálny snímač

Rotačný snímač IRC 430 [12] je určený pre prevod informácií vzájomnej uhlovej polohy dvoch mechanických častí na elektrické impulzy (inkrementy). Počet impulzov zodpovedá veľkosti zmeny polohy a frekvencii impulzov rýchlosti pohybu. Jeho základnú časť tvorí teleso s osvetľujúcim systémom, kovový alebo plastový odmeriavací kotúč a vyhodnocovacia elektronika. Výhodami tohoto snímača je široké použitie (robotika, strojárstvo, prístrojová technika), výstup s otvoreným kolektorom a nízka prúdová spotreba.

Technické parametre

- Maximálne zaťaženie hriadele - radiálne 20 N
- Maximálne zaťaženie hriadele - axiálne 20 N
- Maximálne mechanické otáčky 6000/min
- Moment zotrvačnosti rotačných častí 50 g/cm²
- Hmotnosť 0,02 kg

Elektrické parametre

- Maximálny kmitočet výstupného signálu 50 kHz
- Napájacie napätie pracovného obvodu 5 V_{ss} ± 10 %
- Maximálna prúdová spotreba 50 mA

Pracovné parametre

- Pracovná teplota -10 až 70° C
- Maximálna relatívna vlhkosť 90 %
- Maximálne chvenie 50 Hz

Zapojenie vodičov

- červený kábel - napájanie elektrického obvodu
- čierny kábel - zemiaci vodič
- zelený (modrý) kábel - výstup A, priamy signál
- biely kábel - výstup B, priamy signál
- žltý kábel - výstup C, nulový pulz

3.5 Napájací zdroj

Pre napájanie modelu helikoptéry sú použité dva spínacie zdroje od výrobcu BKE typu JS-100-120/UK. Prvý zdroj je použitý pre napájanie jednosmerného motora v rovine elevácie. Druhým motorom napájame samotnú platformu CompactRIO a súčasne i vedľajší jednosmerný motor v rovine azimutu.

Technické parametre

Spínané napájacie zdroje BKE JS-100-120/UK [9] s vysokou účinnosťou a stabilizovaným výstupným napätím sú určené pre napájanie meracích a riadiacich systémov s maximálnym výkonom 100 W. Mechanicky sú prispôsobené pre montáž do zariadení. Typové označenie za lomítkom dokazuje, že zdroje sú zabezpečené krytom so stupňom ochrany IP 20. Na prednom paneli sú umiestnené výstupné svorky a zelená LED dióda k identifikácii prevádzky.

Vstup

- Vstupné napätie 180-260 V
- Vstupný kmitočet 47-63 Hz
- Vstupný prúd 0,8 A/230 V
- Istiaca poistka 4 A/250 V

Výstup

- Výstupné napätie 12 Vss
- Tolerancia napätia $\pm 4\%$
- Zvlnenie(p-p) 80 mVss
- Výstupný prúd 0-7 A
- Účinnosť 80 %
- Doba prekrytia výpadku siete 50 ms/230 V
- Ochrana proti preťaženiu
- Ochrana proti skratu na výstupe
- Výstupné svorky do 2,5 mm²

Ostatné údaje

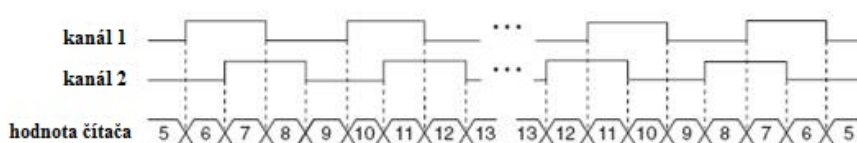
- Rozmery 166x74x43 mm
- Hmotnosť 0,45 kg
- Prevádzková teplota 0 až 50° C
- Prevádzková relatívna vlhkosť 10-80 %

4 TVORBA PROGRAMU

Celý program vytvárame pomocou programu LabVIEW a jeho FPGA rozhrania (viď kapitola 2.2.2) , ktoré má náväznosť na rozhranie real-time (viď kapitola 2.2.1). Celý program je rozdelený na viacero podprogramov, takzvaných smyčiek. Každý podprogram rieši určitú časť komplexného programu, jednotlivé časti na seba navzájom nadväzujú pomocou lokálnych premenných. Program je vytváraný pomocou blokových diagramov. Každý prvok reprezentuje určitú funkciu a následne sa zobrazuje aj ako tlačidlo, textové pole pre zadávanie konkrétnej premennej, LED indikátor pre zobrazenie „true/false“ hodnoty, či iný vizualizačný nástroj.

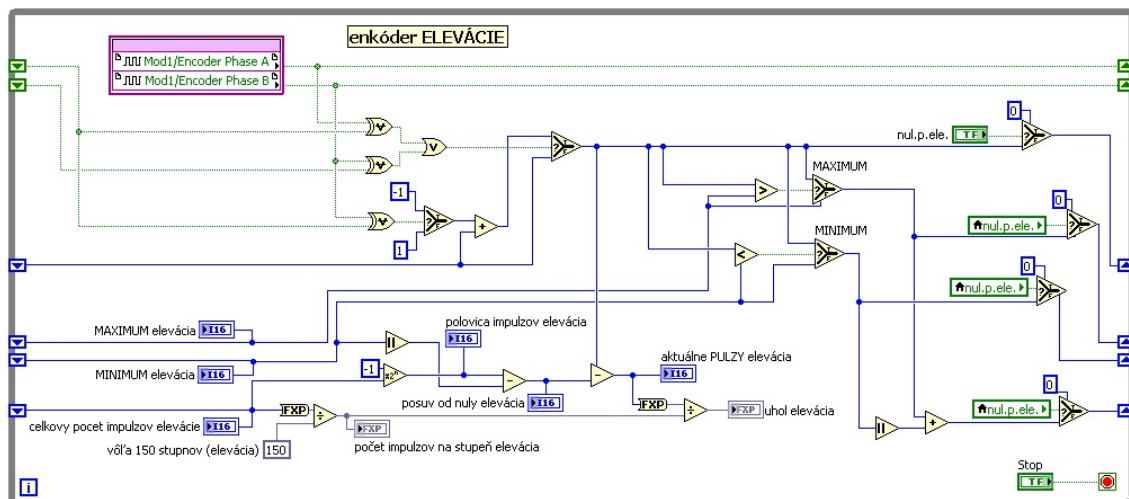
4.1 Enkóder

Enkóder je elektricko mechanické zariadenie prevádzajúce uhol natočenia na analógový alebo digitálny výstup. V našom programe máme privedené hodnoty z inkrementálneho enkóderu, kde porovnávame navzájom fázový posuv dvoch kanálov (4.1). Čítač je vytvorený pomocou logických funkcií XOR a OR. Inkrementuje alebo dekrementuje hodnotu na každej signálovej hrane kanálu. Inkrementácia alebo dekrementácia závisí na tom, ktorý kanál predbieha ten druhý o 90°. Každý cyklus má za následok inkrementáciu alebo dekrementáciu hodnoty o štyri pulzy. V enkóderi je implementovaný index enkóderu, ktorý pri každej otáčke inkrementuje hodnotu pulzu. Toto v našom programe využívať nebudeme, ale je to užitočné pre mnoho aplikácií, kde potrebujeme pomocou takéhoto indexu odstrániť chybu, ktorá vznikne počas jednej otáčky enkóderu.



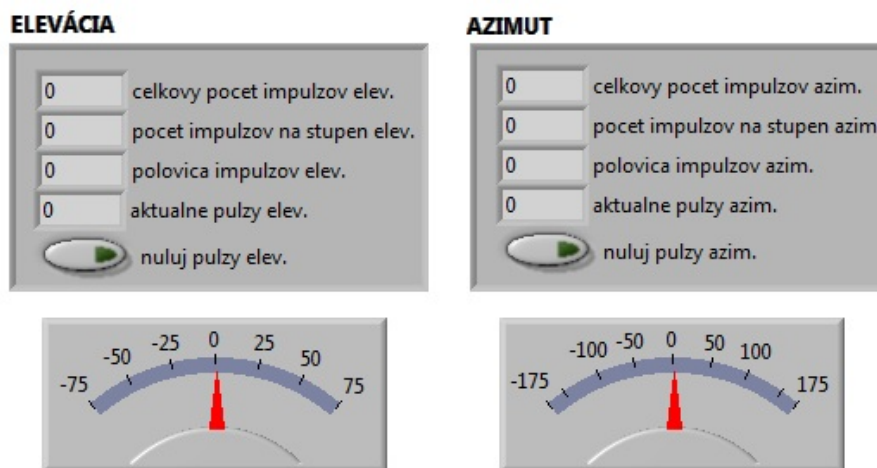
Obr. 4.1: Fázový posuv dvoch kanálov enkóderu.

Pomocou nami vytvoreného algoritmu, pracujúceho v FPGA module, dostávame z enkóderu *aktuálne pulzy*. Zisťujeme *maximálnu* a *minimálnu* hodnotu pulzov, ktorých hodnoty ukladáme do *registrov*. Pri známych hodnotách minimálnej a maximálnej hodnoty v registri vieme určiť *celkový počet pulzov*, ktoré je možné dosiahnuť. Následne musíme zistiť *pomer*, ktorý vyjadruje koľko pulzov pripadá na jeden stupeň. Naš model má maximálny konštrukčne povolený rozsah 150° pre rovinu elevácie a 350° pre rovinu azimutu. Prevedením korekcie nulových impulzov a vydelením aktuálneho počtu pulzov našim pomerom získavame skutočný uhol natočenia.



Obr. 4.2: Enkóder vytvorený v programe LabVIEW.

Pre kalibráciu je potrebné zastabilizovať model helikoptéry a vynulovať pulzy pre zvolenú rovinu pomocou tlačidla *nuluj pulzy* (Tlačidlo si môžeme všimnúť na obrázku 4.3.). Následným posunutím modelu helikoptéry do krajných polôh v oboch smeroch pre rovinu elevácie alebo azimutu prebehla kalibrácia uhlu. Spätnou kontrolou správnej kalibrácie je zobrazovanie správneho uhlu natočenia v rozmedzí -75° až 75° pre rovinu elevácie a -175° až 175° pre rovinu azimutu.



Obr. 4.3: Programové prostredie určené ku kalibrácii uhlov modelu helikoptéry.

4.2 PWM modulácia

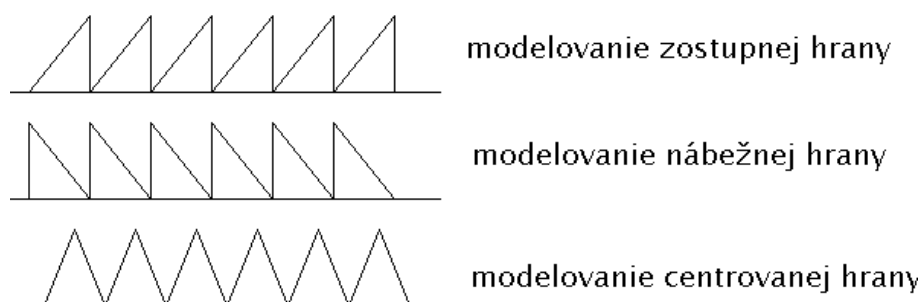
PWM modulácia (pochádza z anglického slova pulse-width modulation, v slovenskom preklade to znamená pulzne-šírková modulácia) je technika používaná na vytvorenie analógového signálu pomocou digitálneho zariadenia (napríklad mikrokontrolér). Digitálne zariadenie sa používa na vytvorenie obdĺžnikového priebehu s dvoma binárnymi stavmi (zapnutie, vypnutie). Tento priebeh môže simulovať hodnotu medzi maximálnou a minimálnou hodnotou príslušného signálu (napríklad napätia), pomocou zmeny pomeru, kedy je signál v stave vypnutia a zapnutia. Doba zapnutia sa nazýva šírka impulzu. Pre získanie rôznej analógovej hodnoty musíme modulovať rôzne šírky impulzov. Zapínanie a vypínanie prebieha v cykle (tzv. duty cycle), ktorý je definovaný ako strieda PWM periódy a udáva sa v percentách. Rozlíšenie PWM modulácie je dané maximálnym počtom impulzov, ktoré môžeme počas jednej periódy generovať. Naša PWM moduluje zostupnú hranu, pričom pracuje s frekvenciou 20kHz. Okrem modelovania zostupnej hrany existuje i modulácia nábežnej alebo centrovanej hrany.

Zarovnanie PWM modulácie:

Modulácia zostupnej hrany - koncová hrana je modulovaná a nábežná hrana je pevná (v každom cykle rovnaká, časovo nemenná). Strieda je určená časom, kedy je prepínač v stave zapnutia.

Modulácia nábežnej hrany - nábežná hrana je modulovaná a koncová hrana je pevná (v každom cykle rovnaká, časovo nemenná). Strieda je určená časom, kedy je prepínač v stave vypnutia.

Modulovanie centrovanej hrany - centrovaná hrana je umiestnená pevne v strede časového úseku, modulovaná je súčasne nábežná i koncová hrana.



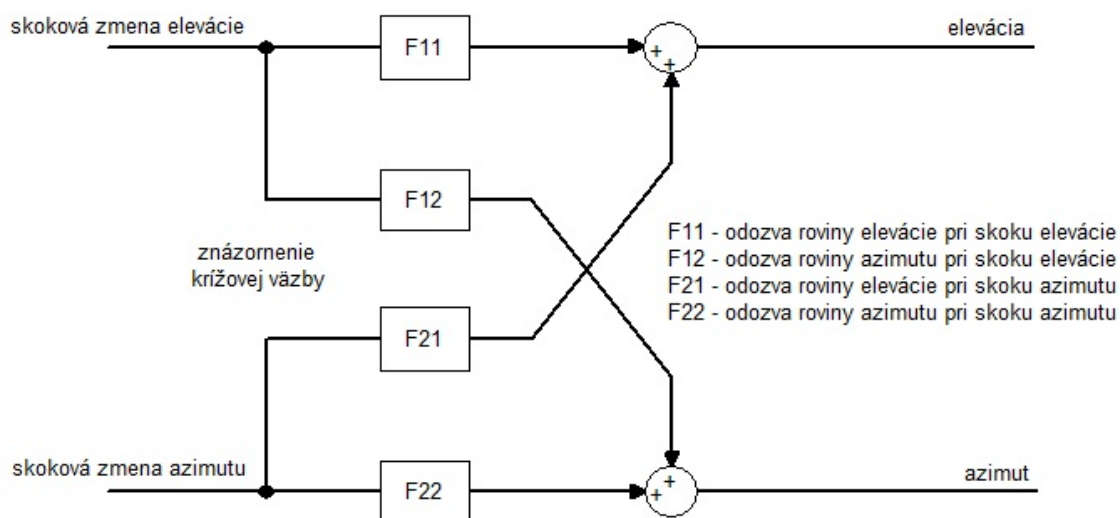
Obr. 4.4: Zarovnanie PWM modulácie.



26

4.3 Krížová väzba

Aktívnym experimentom uvedeným v kapitole 4.4 získavame vstupné a výstupné prechodové charakteristiky, z ktorých pomocou identifikačného nástroja MATLABu (viď. kapitola 4.4.1) dostávame prenosy sústav F_{11} , F_{12} , F_{azim} . Na obrázku 4.6 je znázornená krížová väzba medzi rovinou elevácie a rovinou azimutu. Vytvorením skokovej zmeny elevácie sa prejaví ako pre rovinu elevácie, tak parazitne i pre rovinu azimutu. Platí to i opačne. Vytvorením skokovej zmeny azimutu sa prejaví ako pre rovinu azimutu, tak parazitne i pre rovinu elevácie. Tieto krížové väzby budeme ďalej vnímať ako poruchy pôsobiace na systém a pri návrhu regulátorov s tým budeme musieť počítať. Pri identifikácii systému je táto krížová väzba dôležitá k určeniu sústavy roviny azimutu. V rovine elevácie protisilu pôsobiacu na model predstavuje gravitačné zrýchlenie. V rovine azimutu gravitačné zrýchlenie nespôsobuje potrebné protisily, preto musíme využiť vedľajšie účinky motora elevácie. Točenie vrtule systém neotáča len v rovine elevácie, ale aj v rovine azimutu (doprava alebo doľava, podľa smeru otáčania vrtule).



Obr. 4.6: Krížová väzba medzi rovinou elevácie a azimutu.

4.4 Identifikácia systému

Slovným spojením „identifikácia systému“ si môžeme vo všeobecnosti predstaviť vytvorenie vhodného matematického modelu reprezentujúceho skutočný a fyzicky reálny systém. Identifikáciu rozdeľujeme do dvoch základných kategórií. Jednou je identifikácia vychádzajúca z matematicko-fyzikálneho skúmania modelu, takzvaná analytická identifikácia. Druhá kategória, experimentálna identifikácia, sa zaoberá skúmaním vstupných a výstupných dátových tokov, pričom potrebné údaje zaznamenáva a uchováva pre ďalšie spracovanie. Jedným z možností spracovania signálu je použitie programového prostredia MATLAB, ktoré poskytuje identifikačný nástroj (Identification toolbox) pre získanie výsledného modelu z nameraných dát.

4.4.1 Identifikačný nástroj MATLABu

Identifikačný nástroj integrovaný v prostredí MATLABu vytvára matematické modely dynamických systémov z nameraných vstupných a výstupných dát pomocou identifikačnej metódy najmenších štvorcov. Poskytuje aplikácie na vytvorenie dynamického modelu zo získaných údajov pomocou prechodovej charakteristiky, frekvenčnej charakteristiky, či vstupno-výstupných dát. Identifikáciou dostávame spojitý, diskretný alebo stavový popis systému.

Na obrázku 4.7 môžeme vidieť prostredie pre identifikáciu systému, vysvetlíme si funkcie niektorých okien:

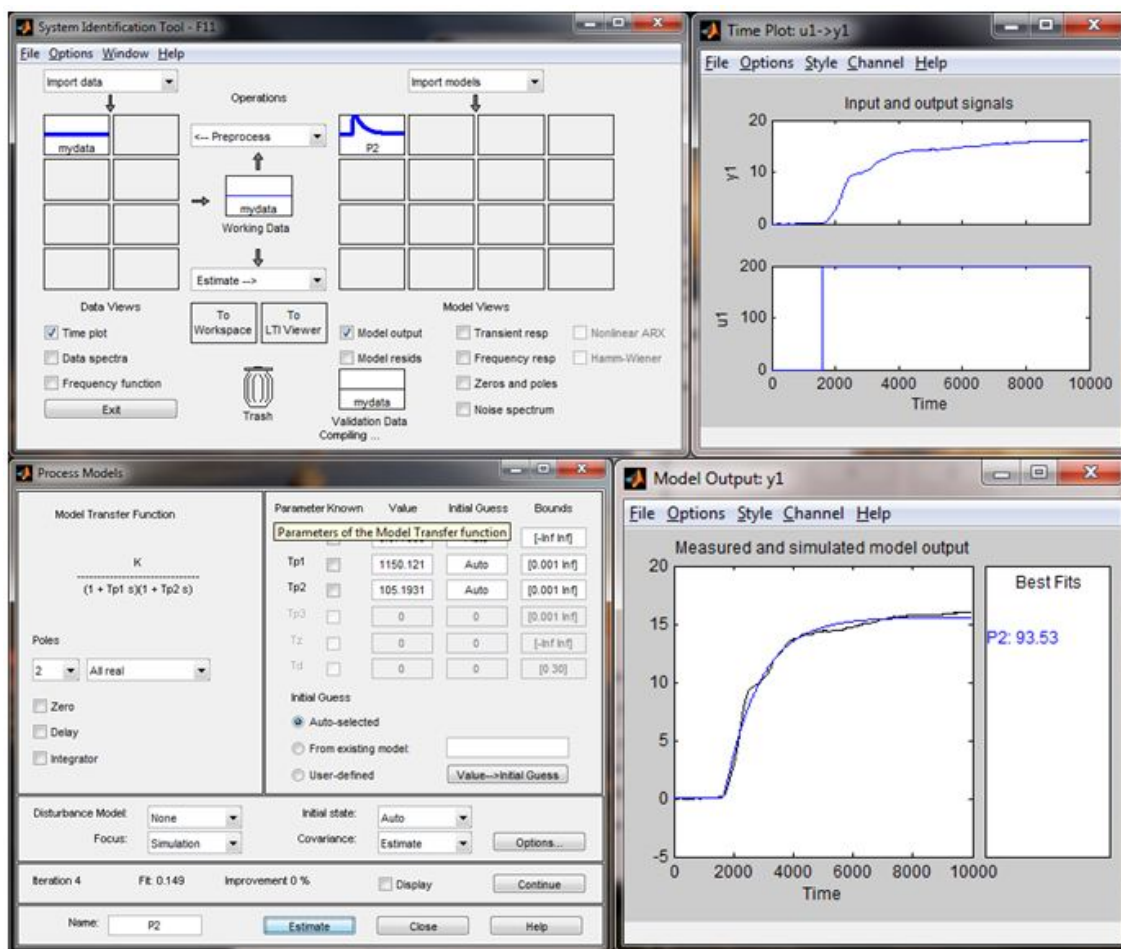
System Identification Tool - ako z anglického názvu vyplýva ide o hlavné nástrojové okno, pomocou ktorého otvárame všetky následné okná a funkcie slúžiace k identifikácii. Navyše obsahuje rôzne doplnky, ako zobrazenie odozvy sústavy na jednotkový skok, export identifikovanej sústavy do prostredia MATLABu pre ďalšie spracovanie, vymazanie nevhodného signálu, jeho dodatočnú úpravu a iné.

Import Data - určujeme vstupno-výstupné dáta, ktoré môžeme upraviť tak, aby odozvy začínali v nule, môžeme určiť štartovací čas a vzorkovaciu periódu.

Time Plot - v tomto okne je možné zobraziť vstupno-výstupné dáta v závislosti na čase a overiť tak požadovaný tvar signálov.

Process Models - týmto nástrojom získavame výsledné prenosy identifikovanej sústavy na základe vopred odhadovaných parametrov. Odhadujeme rád sústavy, nulu v počiatku, oneskorenie a integračnú zložku v menovateli sústavy.

Model Output - slúži pre zobrazenie a porovnanie odhadovaných sústav z nástroja *Process Models*, výsledné priebehy ohodnocuje na základe zhody s identifikovanou sústavou a udáva ich percentuálnu zhodu.



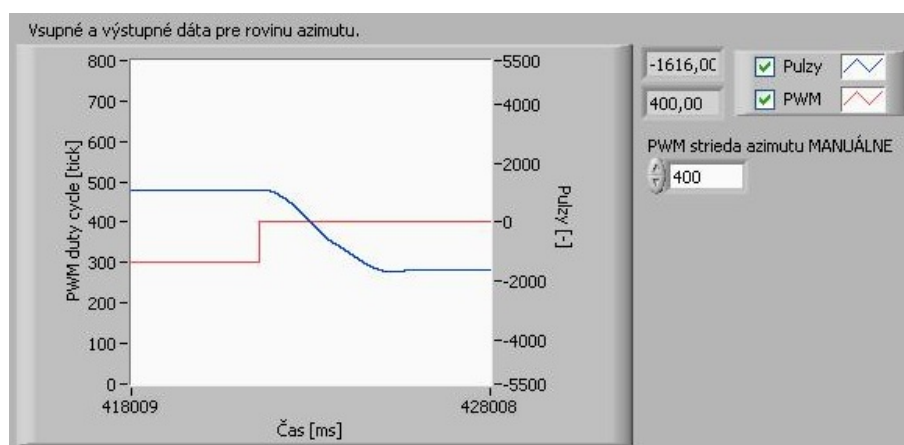
Obr. 4.7: Identifikačný nástroj v MATLABe.

4.4.2 Postup identifikácie

Identifikáciu modelu helikoptéry budeme prevádzať v už spomínanom programovom prostredí MATLABu a jeho identifikačného nástroja. Pre jeho použitie najskôr však potrebujeme získať vstupné a výstupné dáta z experimentálnej identifikácie. Vstupné, umelo vytvárané dáta bude predstavovať PWM modulácia (viď. kapitola 4.2) napäťového signálu privádzaná ako vstup do motorov. Výstupom bude zaznamenávaný, v čase meniaci sa počet pulzov enkóderu, čo predstavuje naklonenie alebo natočenie (rovina elevácie a azimutu) modelu helikoptéry.

Najskôr si zvolíme pracovný bod, čo je uhol naklonenia a natočenia helikoptéry v okolí 0° . Vytvorením skokovej zmeny pôsobiacej na vstupe (PWM) sledujeme odozvu na výstupe (pulzy enkóderu). Skokovú zmenu na vstupe pre rovinu elevácie nastavujeme zmenou striedy zo 700 tikov (35 % strieda PWM modulácie) na 900 tikov (40 % strieda PWM modulácie) a pre rovinu azimut z 300 tikov (15 %

strieda PWM modulácie) na 400 tikov (20 % strieda PWM modulácie). Na výstupe sledujeme ako sa mení uhol natočenia a naklonenia modelu helikoptéry. Toto všetko je zaznamenávané do grafu vo vývojovom prostredí LabVIEW a jeho programového prvku „waveform chart“, znázorneného na obrázku 4.8. V tomto okne si môžeme všimnúť dátové pole pre manuálne nastavenie striedy vstupného signálu a identifikátory numerického zobrazenia aktuálnej hodnoty na vstupe a výstupe. Zobrazenie vybraného signálu, ktoré je farebne odlíšené, je možné povoliť alebo zakázať pomocou zaškrtávacieho políčka.

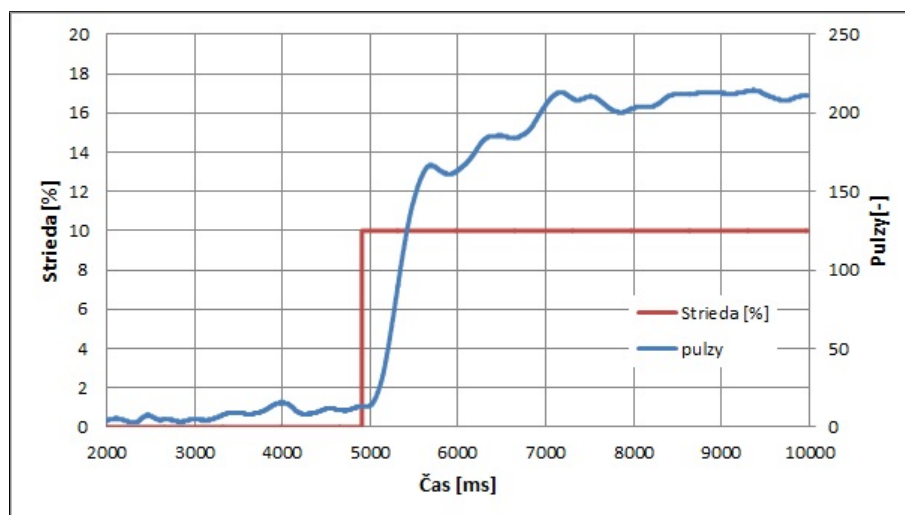


Obr. 4.8: Zobrazenie vstupného a výstupného signálu pre identifikáciu.

Dáta z tohoto programového prvku dokážeme odoslať do *Microsoft excel-u*, kde ich môžeme upraviť. Úpravou myslíme orezanie prebytočne dlhého časového úseku pred alebo za skokovou zmenou signálu. Korekciu pulzov enkóderu, tak aby dáta začínali v nule. Posunutie vstupnej skokovej zmeny tak, aby mala začiatok takisto v nulovej hodnote. Prepočet alebo korekciu časovej osi a iné. Tieto úpravy je možné dosiahnuť i pri vkladaní dát do identifikačného prostredia v MATLABE. V tomto nástroji sú k dispozícii aj nástroje pre redukciu šumu, zmenu rozsahu, vzorkovacej periódy a iné.

Odozva jednotkového skoku elevácie na rovinu elevácie (F11)

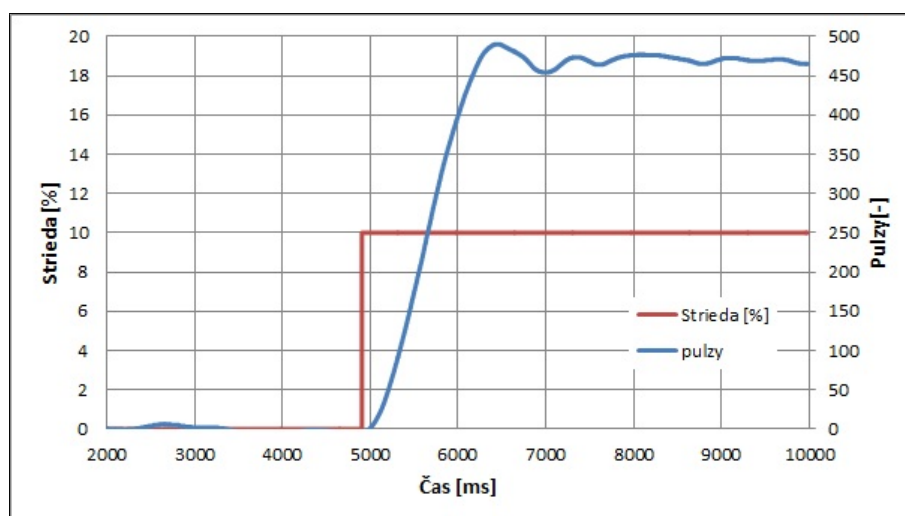
$$\begin{aligned}
 F11(s) &= \frac{K}{(1 + 2\xi T_1 s + T_1^2 s^2)(1 + T_2 s)} = \\
 &= \frac{1,19}{1 + 0,43 s + 0,03 s^2 + 0,01 s^3}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$



Obr. 4.9: Vstupno-výstupné dáta F11.

Odozva jednotkového skoku elevácie na rovinu azimutu (F12)

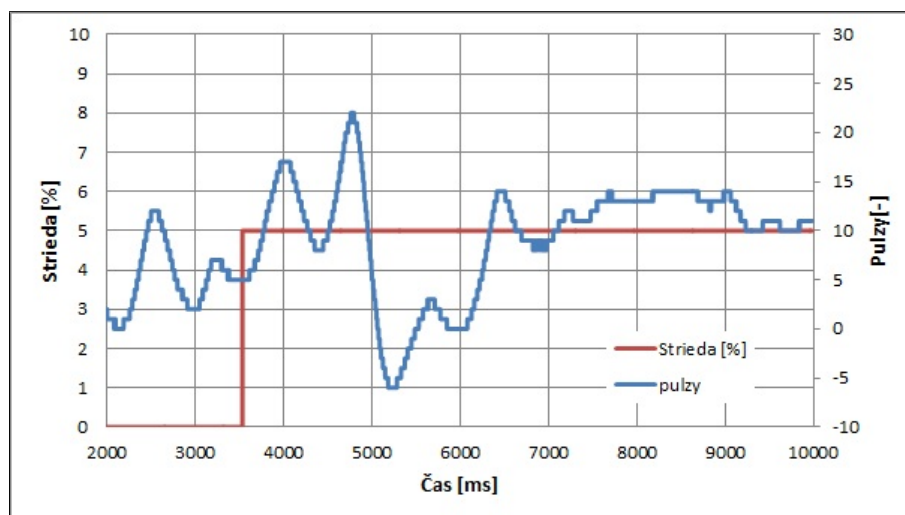
$$F12(s) = \frac{K}{1 + 2\xi T_1 s + T_1^2 s^2} = \frac{2,30}{1 + 0,63 s + 0,45 s^2} \quad (4.2)$$



Obr. 4.10: Vstupno-výstupné dáta F12.

Odozva jednotkového skoku azimutu na rovinu elevácie (F21)

Táto poruchová odozva azimutu na rovinu elevácie je taká malá, že nedokážeme ani identifikovať jej sústavu, a preto ju budeme ďalej považovať za nepodstatnú. Nebudeme s ňou ďalej pracovať ani pri návrhu regulátora.

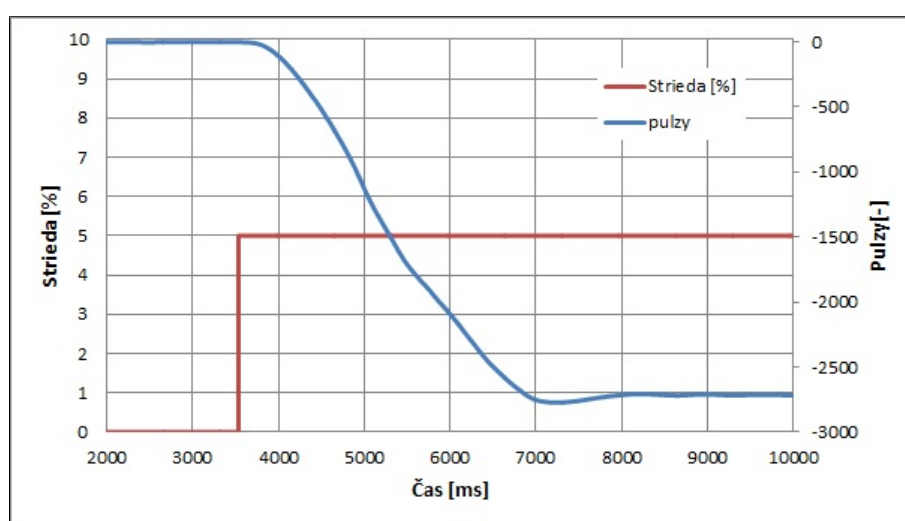


Obr. 4.11: Vstupno-výstupné dáta F21.

Odozva jednotkového skoku azimutu na rovinu azimutu (F22)

Pre túto odozvu nebudeme prevádzkať identifikáciu, pretože získanie samotnej sústavy bez pôsobenia krútiaceho momentu motora z roviny elevácie nedáva v našom programe ďalšie využitie. K našim potrebám je nutné prevádzkať identifikáciu celej vetvy azimutu, kde počítame krížovú väzbu z motora roviny elevácie ako potrebnú protisilu. Takúto sústavu nazveme F_{azim} a predstavuje súčet sústav $F12$ a $F22$.

$$F_{azim}(s) = \frac{K}{1 + 2\xi T_1 s + T_1^2 s^2} = \frac{-25,10}{1 + 1,32 s + 1,37 s^2} \quad (4.3)$$



Obr. 4.12: Vstupno-výstupné dáta F_{azim} .

4.5 Regulátory

4.5.1 PID regulátor

PID regulátor je najčastejšia forma regulátora. Vyskytuje sa vo všetkých oblastiach, kde sa regulácia používa. Máme rôzne formy regulátorov pre jednoduchú alebo zložitejšiu, rozvetvenú regulačnú smyčku, ktoré sú používané v najrôznejších odvetviach. PID regulátor je často kombinovaný s logickými, sekvenčnými funkciami, selektormi a jednoduchými funkčnými blokmi tvoriacimi zložitý riadiaci systém využívaný pri produkcii energií, v doprave a výrobe. Môžeme povedať, že PID regulátor je akýmsi nevyhnutným nástrojom každého, kto tvorí riadiace systémy. V minulosti prešli vývojom od mechanických a pneumatických regulátorov cez elektrónky, tranzistory, integrované obvody až ku mikroprocesorom. Dnes využívané mikroprocesorové PID regulátory vytvorili príležitosti k ďalšiemu rozvoju samonastaviteľných, adaptívnych alebo samonastavovacích regulátorov. [2]

P, I a D zložka regulátora

Jednotlivé zložky PID regulátoru sú na seba vzájomne naviazané. Použitím proporcionálneho regulátora síce dochádza k ustáleniu výslednej hodnoty pomocou zvyšovania zosilnenia v proporcionálnej zložke, ale má to za následok i zvýšenie tendencie kmitania na výstupe. Je zrejmé, že tento typ regulátora nie je schopný zaistiť nulovú ustálenú odchýlku žiadanej hodnoty pre statické sústavy, rovnako ako nedokáže zaistiť nulovú ustálenú odchýlku žiadanej hodnoty pri pôsobení poruchy na vstupe sústavy. Pridaním integračnej zložky k proporcionálnej vzniká PI regulátor, ktorý je schopný zaistiť nulovú ustálenú odchýlku žiadanej hodnoty, ako aj ustálenie žiadanej hodnoty pri pôsobení poruchy na vstupe sústavy. Znižovaním hodnoty integračnej časovej konštanty dochádza k zvýšeniu účinkov integračnej zložky. Integračná zložka síce zabezpečí nulovú ustálenú odchýlku žiadanej hodnoty od skutočnej hodnoty, no dochádza pritom i k spomaleniu vyregulovania žiadanej hodnoty. Ak chceme zrýchliť vyregulovanie žiadanej hodnoty, môžeme použiť derivačnú zložku, ktorá obsahuje derivačnú časovú konštantu, ktorá zrýchľuje regulačný dej tým, že odstraňuje náhle zmeny regulovanej veličiny. Vzniká PID regulátor. Voľba veľkosti časovej derivačnej konštanty však musí byť „rozumná“, pretože príliš veľká hodnota má za následok spomalenie regulačného deja. Ideálny regulátor s použitou derivačnou zložkou nie je fyzikálne realizovateľný. Jeho citlivosť na šum v riadiacej veličine a derivácia nepresného signálu môže viesť k veľkým a častým zmenám amplitúdy riadenia. Doplnením filtra prvého rádu do ideálneho PID regulátora, získavame reálny regulátor.

4.5.2 Číslicový PID regulátor

Spojité idealizovaný PID regulátor [3] je učebnicovo najčastejšie popisovaný rovnicou:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.4)$$

kde K_p je proporcionálne zosilnenie, T_I je integračná časová konštanta, T_D je derivačná časová konštanta. Pridaním vzorkovacej periódy T_0 a diskreditáciou integračnej a derivačnej zložky z rovnice (4.4) dostávame tvary:

$$\frac{de}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T_0} = \frac{\Delta e(k)}{T_0} \quad (4.5)$$

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx T_0 \sum_{i=1}^k e(i) \quad (4.6)$$

kde výsledný tvar diskreditovaného PID regulátoru je:

$$u(k) = K_p \left\{ [e(k) + \frac{T_0}{T_I} \sum_{i=1}^k e(i) + \frac{T_D}{T_0} [e(k) - e(k-1)]] \right\} \quad (4.7)$$

Pre naše potreby použijeme zložkový tvar regulačného zásahu, kedy je výsledná hodnota tvorená súčtom jednotlivých zložiek regulátora, pričom sa v pamäti uchováva iba predošlá hodnota integračnej zložky. Tento tvar potom vypadá nasledovne:

$$u(k) = u_P(k) + u_I(k) + u_D(k) \quad (4.8)$$

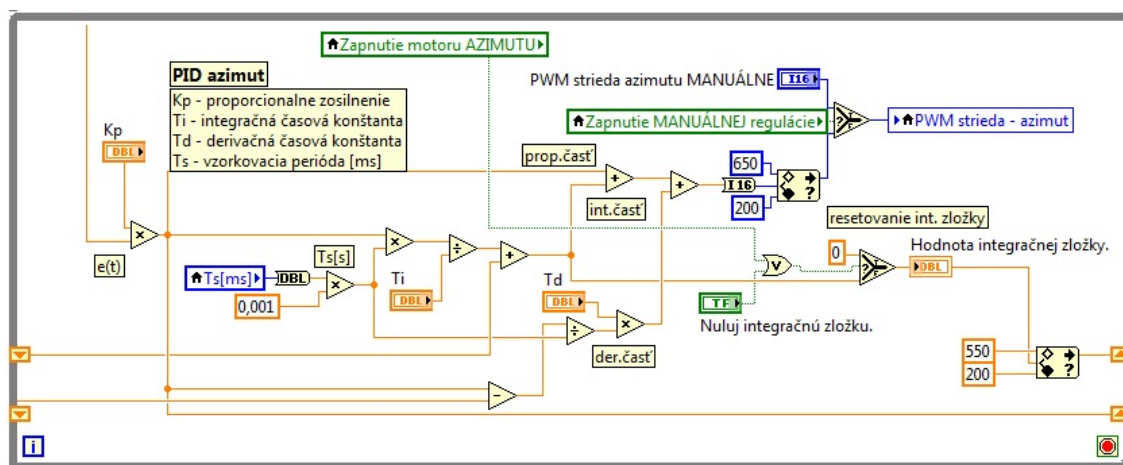
$$\begin{aligned} \text{kde :} \quad u_P(k) &= K_P e(k) \\ u_I(k) &= K_P \frac{T_0}{T_I} \sum_{i=1}^k e(i) = u_I(k-1) + K_P \frac{T_0}{T_I} e(k) \\ u_D(k)C &= K_P \frac{T_D}{T_0} [e(k) - e(k-1)] \end{aligned}$$

4.5.3 Vytvorenie PID regulátora

Vývojové prostredie LabVIEW ponúka širokú škálu predvytvorených regulátorov pre najrôznejšie použitie. Vymenujeme si pár príkladov, ktoré sú v ponuke. Samočinne sa nastavujúci regulátor dokáže na základe výstupu a požadovanej hodnoty nastaviť parametre PID regulátora a to či jednorázovo pri začatí regulácie alebo priebežne počas celej regulácie. Prúdový regulátor, kde vstupné a výstupné hodnoty sú určené pre reguláciu prúdu. Regulátor „gain-scheduling“, ktorý podľa požadovanej hodnoty určuje, ktorý zo skupiny regulátorov má použiť. Zvyčajne sa používa

pri nelineárnych sústavách, kde je potrebné dosiahnuť väčšiu škálu regulácie, napríklad použitím iných zosilnení. Existuje regulátor teploty, ktorý má prevrátenú hodnotu akčného zásahu. Pre motorové potreby je tam regulátor na reguláciu polohy, rýchlosti alebo zrýchlenia. Niektoré regulátory majú v sebe zabudované obmedzenie integračnej zložky, vstupných či výstupných parametrov. Všetky tieto regulátory sú vytvorené pomocou mnohých rozvetvených podprogramov. Táto skutočnosť neumožňuje sledovať fungovanie regulátora. Aké matematické rovnice používa, s akým dátovým typom pracuje alebo na aké hodnoty je obmedzený.

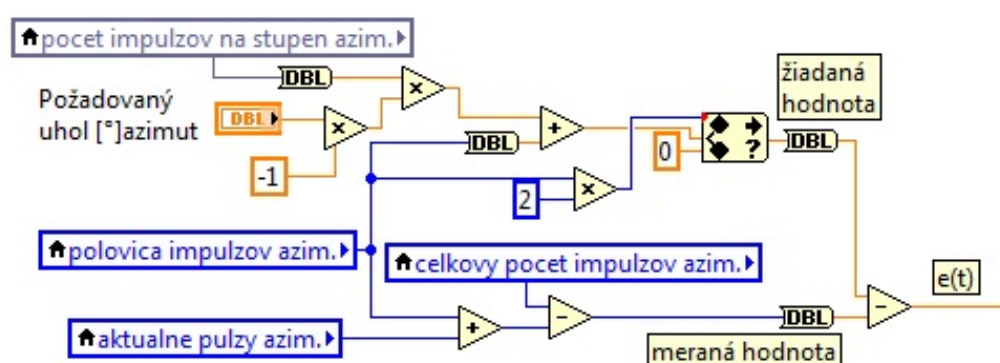
Aspekty uvedené v predošlom odstavci viedli k vytvoreniu nového regulátora pracujúceho v real-time module podľa rovnice 4.8, kde proporcionálna, integračná i derivačná zložka je tvorená pomocou matematických a logických operácií. Predošlá hodnota integračnej zložky alebo regulačnej odchýlky (žiadaná - skutočná hodnota) je zaznamenávaná pomocou registrov a časovej slučky „while“ pracujúcej s periódou 1 ms. Vstupmi do regulátora sú proporcionálne zosilnenie (K_p), integračná časová konštanta (T_i), derivačná časová konštanta (T_d), vzorkovacia perióda ($T_s[\text{ms}]$), v regulátore prepočítaná na sekundy. Výstupom je hodnota privádzaná na vstup požadovanej hodnoty PWM modulácie. Túto hodnotu obmedzujeme na základe fyzických parametrov motorov. Pre rovinu azimut to je v rozsahu 200 tikov (10 % strieda PWM modulácie) až 650 tikov (35,5 % strieda PWM modulácie). Nižšia hodnota udáva minimálnu hodnotu pre roztočenie motora, takže regulácia pod túto hodnotu by mala nežiadúce účinky. Vyššia hodnota obmedzuje maximálnu rýchlosť motora, tak aby nevytvárala nežiadúce dynamické vlastnosti systému, prekročenie maximálneho povoleného prúdu do motora a s tým spojené vypínanie poistky zdroja. Pre rovinu elevácie zavedieme obdobné obmedzenia v rozsahu 200 tikov (10 % strieda PWM modulácie) až 1700 tikov (85 % strieda PWM modulácie).



Obr. 4.13: Nami vytvorený PID regulátor.

4.6 Polohová slučka

Polohová slučka na obrázku (4.14) je akýmsi „medziprvkom“ medzi enkóderom a PID regulátorom. V tejto časti algoritmu získavame regulačnú odchýlku $e(t)$, ako rozdiel žiadanej a skutočnej (meranej) hodnoty. Žiadaná hodnota je uhol v stupňoch prerátavaný na pulzy enkóderu a meraná hodnota sú aktuálne pulzy enkóderu. Pretože zobrazovače uhlov majú aj záporné hodnoty zadávaného uhla, tak je potrebný prepočet pulzov na kladné hodnoty začínajúce v nule. Takouto korekciou zabezpečíme rezistentnosť regulátora voči záporným hodnotám, čo by mohlo v konečnom dôsledku pri regulácii spôsobovať zmenu otáčania motora v rôznych smeroch.



Obr. 4.14: Algoritmus polohovej slučky.

4.7 Návrh regulátora

Návrh regulátora je veľmi obsiahly pojem. Podstatou je snaha zvoliť vhodný typ regulátora a jeho konštanty tak, aby na základe vlastností daného systému dokázal regulátor regulovať výstup regulátora v požadovanom rozsahu hodnôt, a tým riadiť celý systém. Existuje množstvo typov regulátorov, z ktorých volíme rôznymi metódami návrhu ten správny typ a jeho konštanty.

Pri našom systéme budeme postupovať na základe dvoch metód, kedy využijeme návrh regulátora pomocou metódy Zieglera a Nicholosa a metódu štandardného tvaru frekvenčnej charakteristiky otvoreného obvodu. Navrhovať budeme regulátor pre rovinu elevácie a rovinu azimutu, kde krížovú väzbu zanedbáme a vnímame ju ako poruchu, s ktorou sa navrhnutý regulátor musí vysporiadať. Zanedbanie krížovej väzby je možné len pri samotnom návrhu regulátorov. Pri identifikácii tvorí krížová väzba dôležitú súčasť systému, bez ktorej by samotná identifikácia nebola možná.

4.7.1 Návrh regulátora pomocou metódy Zieglera a Nicholisa

Metoda návrhu pomocou Zieglera a Nicholisa [11] je experimentálnou metódou návrhu regulátorov. Pri návrhu nie sú potrebné veľké skúsenosti a znalosti navrhovania regulátorov. Takýto návrh regulátora pracuje s reálnym systémom a kvôli jeho jednoduchosti je veľmi často používaný v praxi. Princípom návrhu je vyradenie integračnej ($T_I = \infty$) a derivačnej zložky ($T_D = 0$) regulátora a zvyšovaním zosilnenia regulátora (K_P) priviesť systém na hranicu stability so zosilnením K_{krit} a periódou netlmených kmitov T_{krit} . Získaním týchto dvoch hodnôt dokážeme na základe tabuľky (4.2) určiť konštanty regulátora.

Tab. 4.1: Vzorce pre návrh regulátora pomocou metódy Zieglera a Nicholisa [11]

Typ regulátora	K_P	T_I	T_D
P	$K_P = 0,5K_{krit}$	-	-
PI	$K_P = 0,45K_{krit}$	$T_I = 0,85T_{krit}$	-
PD	manuálne doladenie	-	$T_D = 0,12T_{krit}$
PID	$K_P = 0,6K_{krit}$	$T_I = 0,5T_{krit}$	$T_D = 0,125T_{krit}$

Privedenie sústavy na hranicu stability nie je vždy to najlepšie riešenie z bezpečnostných a technologických dôvodov. Preto máme viac možností ako získať K_{krit} a T_{krit} . Prvou možnosťou je získanie parametrov z prechodovej charakteristiky, z výsledkom regulácie na základe simulácie modelu sústavy. Pri známom prenose sústavy dokážeme parametre vypočítať.

Použitie metódy Zieglera a Nicholisa je jednoduché a vhodné hlavne pre prípady, kedy nemáme k dispozícii prenos sústavy. Nevýhodou metódy je návrh regulátora na základe jedného bodu prechodovej charakteristiky, čo má za následok neoptimálne nastavenie regulátora. Takto nastavený regulátor vedie k 10 % až 60 % prekmitom, a preto je táto metóda vhodná na získanie počiatočných odhadov.

Rovnice navrhnutých regulátorov

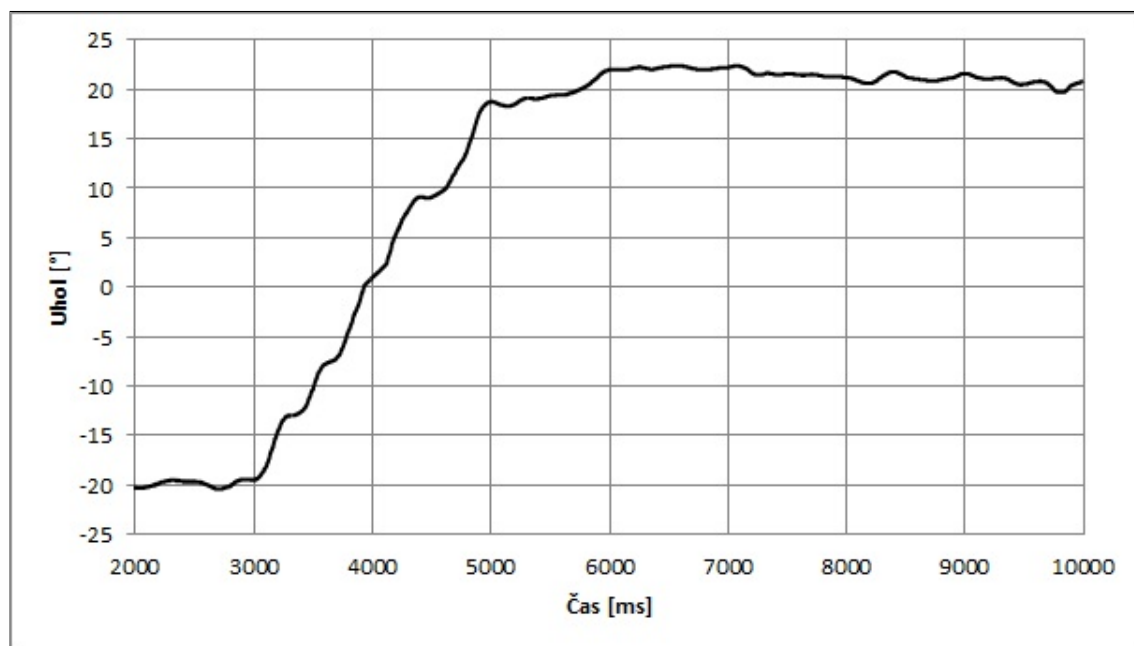
Vyradením integračnej ($T_I = \infty$) a derivačnej zložky ($T_D = 0$) regulátora a zvyšovaním zosilnenia regulátora (K_P) sme priviedli systém na hranicu stability so zosilnením K_{krit} . Sledujeme prechodovú charakteristiku, z ktorej môžeme odčítať periódu netlmených kmitov (T_{krit}). Získaním týchto dvoch hodnôt dokážeme na základe tabuľky (4.2) určiť konštanty regulátora.

Pre rovinu **elevácie** sme dosiahli rozkmitanie systému pri zosilnení $K_{krit} = 1,12$ a z prechodovej charakteristiky sme odčítali periódu netlmených kmitov $T_{krit} = 0,73$ sekundy. Pre rovinu **azimutu** sme dosiahli rozkmitanie systému pri zosilnení $K_{krit} = 0,4$ a z prechodovej charakteristiky sme odčítali periódu netlmených kmitov $T_{krit} = 3,2$ sekundy. Na základe tabuľky (4.2) dostávame parametre regulátorov.

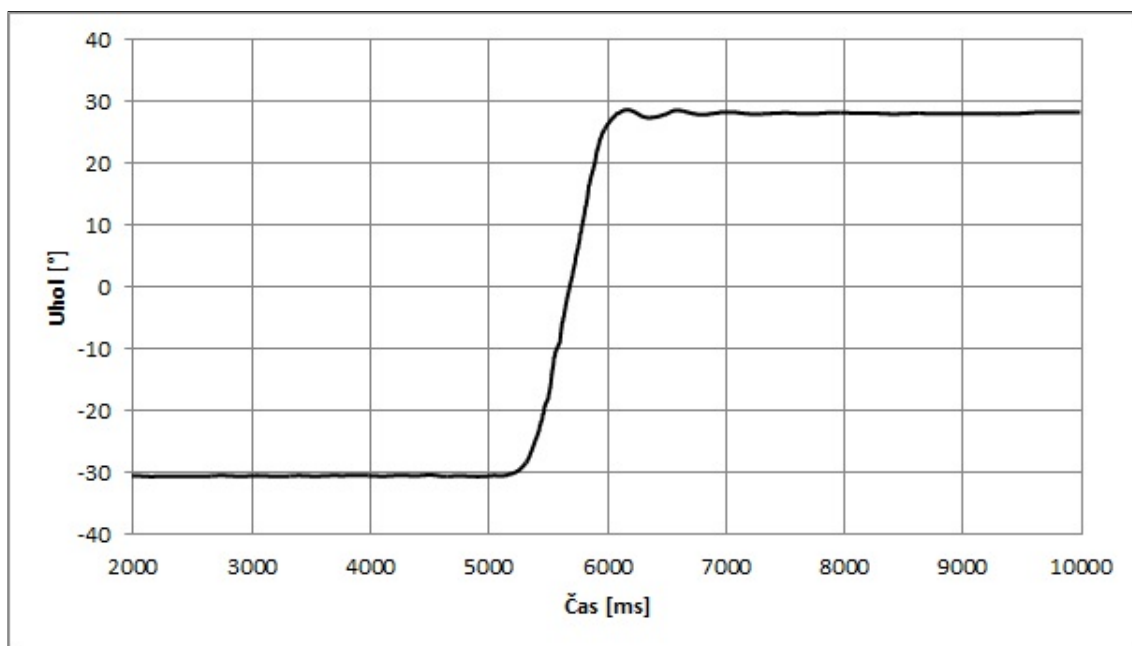
Tab. 4.2: Parametre regulátorov navrhnutých pomocou Zieglera a Nicholosa

rovina elevácie	K_P	T_I	T_D
<i>PID</i>	0,672	0,362	0,091
rovina azimutu	K_P	T_I	T_D
<i>PID</i>	0,240	1,600	0,400

Prechodové charakteristiky navrhnutých regulátorov pri zmene požadovaného uhlu elevácie a azimutu.



Obr. 4.15: Grafické zobrazenie zmeny požadovaného uhlu elevácie pri navrhnutom regulátore pomocou metódy Zieglera a Nicholosa.



Obr. 4.16: Grafické zobrazenie zmeny požadovaného uhlu azimutu pri navrhnutom regulátore pomocou metódy Zieglera a Nicholsa.

4.7.2 Analýza pomocou frekvenčnej charakteristiky

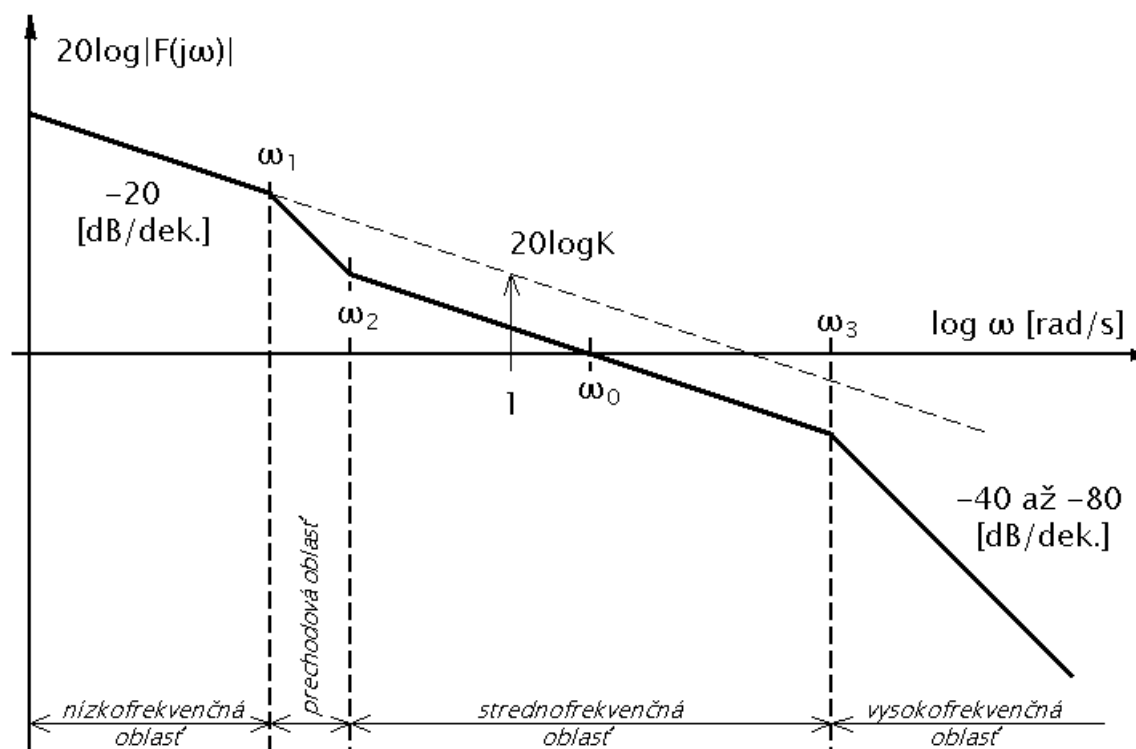
Zásady pre návrh frekvenčných charakteristík musia spĺňať požiadavky pre prenos riadenia a prenos poruchy. Frekvenčná charakteristika prenosu riadenia by mala mať amplitúdu rovnú jednej do čo najvyšších frekvencií a mala by byť bez rezonančných prekmitov. Táto požiadavka zabezpečuje čo najrýchlejšiu odozvu na zmenu riadiacej veličiny a rezonančný prekmit určuje kmitavosť uzavretého regulačného obvodu. Frekvenčná charakteristika prenosu poruchy by mala byť čo najmenšia v celom rozsahu frekvencií kvôli potlačeniu poruchy v celom frekvenčnom rozsahu. [11]

Zásoba stability v amplitúde (amplitúdová bezpečnosť) spätnoväzobného regulačného obvodu je taká hodnota zosilnenia, o ktorú ide aktuálne zosilnenie otvoreného obvodu zväčšiť bez toho, aby došlo k nestabilite systému. Inak povedané je to zmena zosilnenia, ktorá privedie systém na hranicu stability. Podľa obvodu môže byť udávaná vo forme násobiaceho faktoru alebo v dB [11].

Zásoba stability vo fáze (fázová bezpečnosť) je záporne vzatá zmena fáze otvoreného obvodu, ktorá privedie uzavretý obvod na hranicu stability [11].

Analýza dynamických vlastností obvodu sa väčšinou neprevádza z frekvenčnej charakteristiky uzavretého regulačného obvodu, pretože často nie je k dispozícii.

Preto pracujeme s frekvenčnou charakteristikou otvoreného obvodu. Jednotlivé pravidlá návrhu si zhrnieme na typovej amplitúdovo-frekvenčnej charakteristike.



Obr. 4.17: Typová amplitúdová logaritmická frekvenčná charakteristika [13].

2

Zásady a kritéria syntézy vo frekvenčnej oblasti [13]:

- Stabilita uzavretého regulačného obvodu:
 - Zabezpečiť fázovú bezpečnosť otvoreného regulačného obvodu.
 - Dodržať sklon logaritmicko-frekvenčnej charakteristiky v amplitúdovom priesečníku približne -20dB na dekádu.
- Nulová regulačná odchýlka:
 - V otvorenom regulačnom obvode zabezpečiť sklon -20dB na dekádu v nízko-frekvenčnej oblasti charakteristiky.
 - Amplitúda predĺženej nízko-frekvenčnej oblasti pri $\omega=1\text{rad/s}$ má mať hodnotu $20\log K$.
 - Amplitúdový priesečník $\omega = \omega_0$ má ležať približne uprostred stredno-frekvenčnej oblasti.
 - Posun ω_0 k nižším frekvenciám vedie k spomaleniu regulačného procesu.
 - Rozširovanie pásma medzi ω_2 a ω_3 vedie k zmenšovaniu kmitavosti obvodu a maximálnemu preregulovaniu.

SISOTOOL

Sisotool je kompenzačne interaktívny nástroj pre prácu so spätnoväzobnými obvodmi a návrh regulátorov umožňujúci navrhnuť regulátor na systém s jedným vstupom a jedným výstupom pomocou graficky používateľského rozhrania, ktoré umožňuje návrh regulátora pomocou súboru interaktívnych obrazových prvkov. Tie plnia funkcie pre návrh regulátora a zobrazujú grafické odozvy otvoreného alebo uzavretého regulačného obvodu. Pri návrhu môžeme voľiť zapojenie obvodu a jeho prvkov (prenos riadenia, prenos poruchy, ...) a súčasne vyšetrovať obvod pomocou zobrazovania frekvenčných charakteristík, rozloženia pólov a núl, zobrazenia prenosu riadenia či inej odozvy.

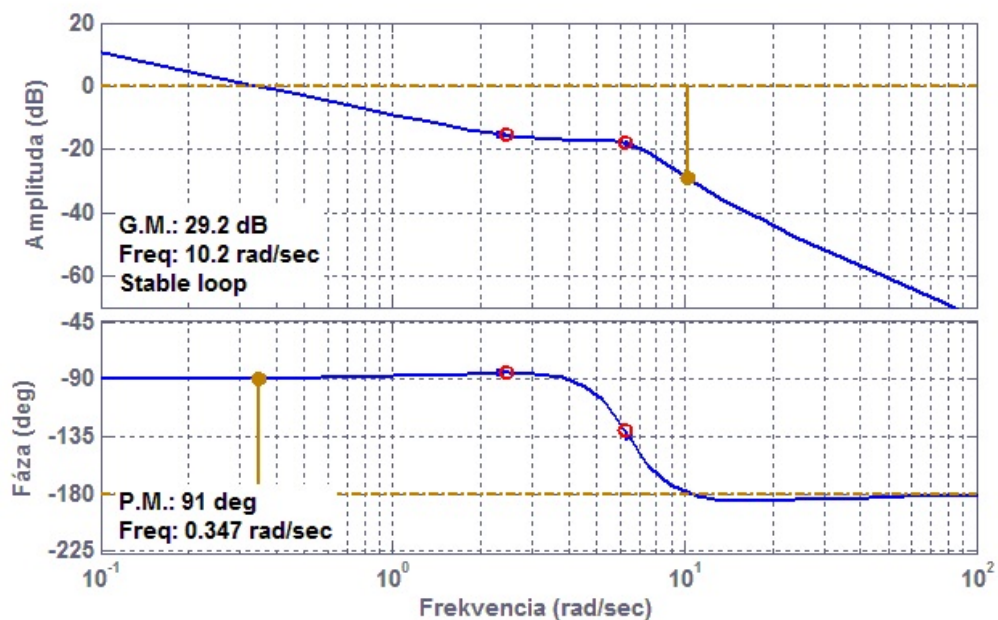
Rovnice navrhnutých regulátorov

Na základe nástroja (sisotool) pre návrh regulátora z MATLABu a vyššie uvedených zásad sme pre rovnice 4.1 a 4.3 navrhli regulátory roviny elevácie i azimutu. Pri návrhu regulátora roviny elevácie sme navrhnutý regulátor nemuseli vôbec upravovať a pri overovaní funkčnosti pracoval korektne. Pri návrhu regulátora pre rovinu azimutu sme museli upraviť zosilnenie tak, aby systém fungoval korektne. Nutnosť úpravy zosilnenia bola spôsobená nesprávnym identifikovaním rovnice 4.3. Tejto chybe sa nedá vyhnúť, nakoľko zosilnenie identifikovanej sústavy ovplyvňuje krížová väzba a identifikované zosilnenie sa mení s otáčkami motora elevácie. Ďalšou chybou môže byť nelinearita typu trenie pôsobiaca v rovine azimutu.

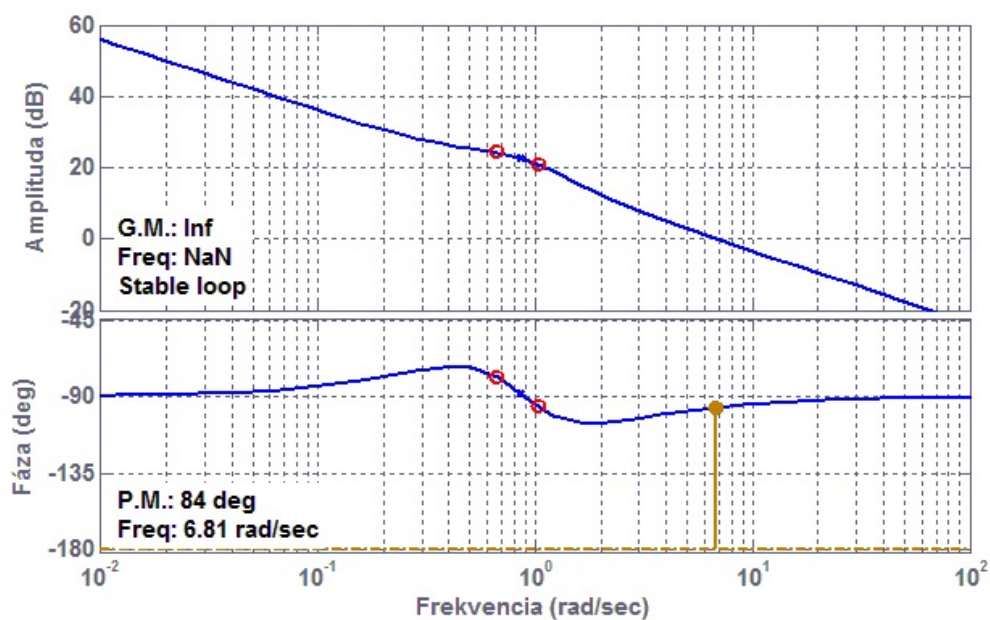
Tab. 4.3: Parametre regulátorov navrhnutých pomocou frekvenčných charakteristík

rovina elevácie	K_P	T_I	T_D
<i>PID</i>	0,29	0,41	0,16
rovina azimutu	K_P	T_I	T_D
<i>PID</i>	0,25	1,50	0,97

Bodeho diagramy navrhnutých rekulátorov elevácie a azimutu pomocou metódy frekvenčných charakteristík.

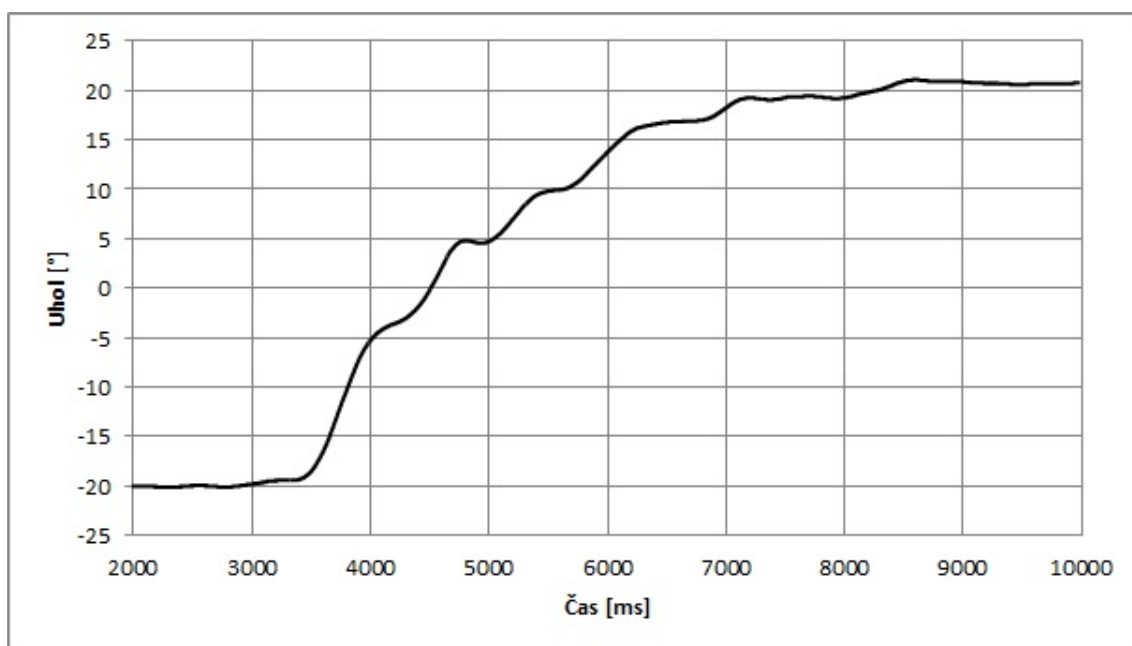


Obr. 4.18: Bodeho diagram pre regulátor roviny elevácie.

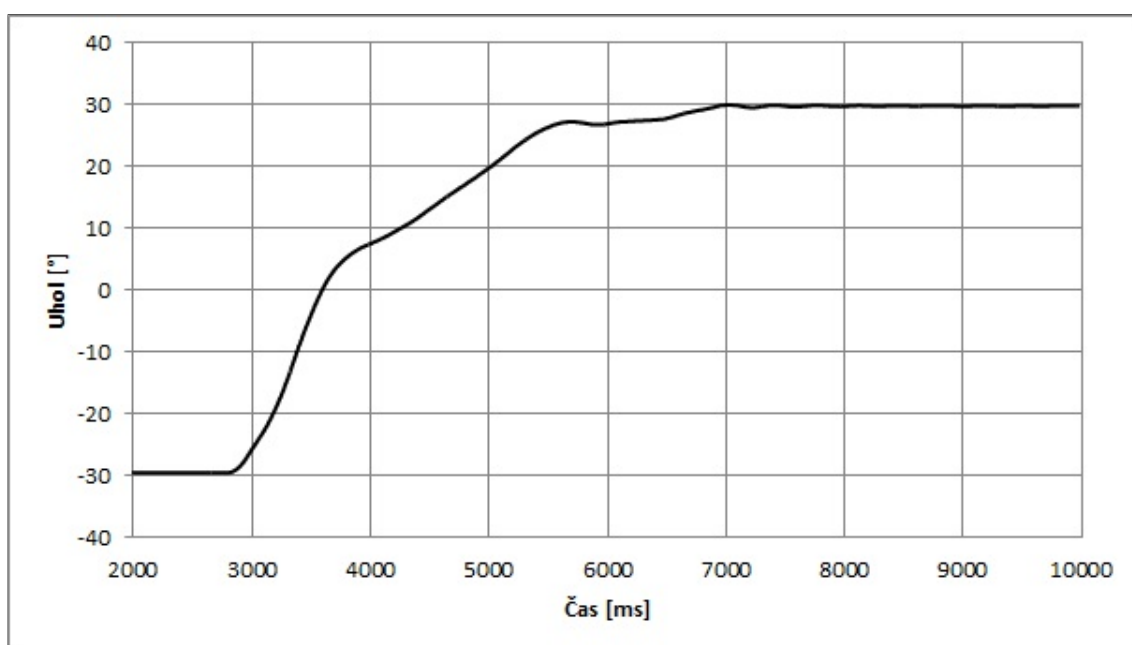


Obr. 4.19: Bodeho diagram pre regulátor roviny azimutu.

Prechodové charakteristiky navrhnutých rekulátorov pri zmene požadovaného uhlu elevácie a azimutu.



Obr. 4.20: Grafické zobrazenie zmeny požadovaného uhlu elevácie pri navrhnutom regulátore pomocou metódy frekvenčných charakteristík.



Obr. 4.21: Grafické zobrazenie zmeny požadovaného uhlu azimutu pri navrhnutom regulátore pomocou metódy frekvenčných charakteristík.

4.8 Wind-up jav

Wind-up jav vzniká pri regulátoroch obsahujúcich integračnú zložku (I, PI, PID). Pri regulátoroch, ktoré neobsahujú integračnú zložku tento jav nenastáva.

Je to fenomén spôsobený v dôsledku nasýtenia akčnej veličiny integračnej zložky regulátora. Každý pohon má svoje obmedzenie: motor má obmedzenú rýchlosť, ventil nemôže byť otvorený alebo zatvorený viac ako naplno, atď.. Pre riadiace systémy to znamená, že riadiaca veličina môže prekročiť limit predstavujúci skutočnú hodnotu výstupu sústavy. V tomto prípade dochádza k poruche spätnej väzby regulácie a systém sa správa ako keby pracoval v otvorenej slučke. Výstup sústavy dosiahne maximálnu možnú hodnotu, no výstup regulátora môže ďalej narastať (za splnenia podmienky, že regulátor obsahuje integračnú zložku). Nárast hodnoty výstupu regulátora sa už na výstupe sústavy nemôže viac prejavíť. Vznik chyby nastáva pri zmene žiadanej hodnoty. Regulačný obvod odpovedá na zmenu žiadanej hodnoty s určitým oneskorením potrebným na odintegrovanie alebo dointegrovanie integračnej zložky regulátora.

4.8.1 Eliminácia Wind-up javu

Tieto nežiadúce účinky regulátora obsahujúceho integračnú zložku sa snažíme eliminovať, práve kvôli predĺženiu vyregulovania žiadanej hodnoty. Všeobecne sú použiteľné dve riešenia eliminácie Wind-up javu. V prvom prípade dokážeme na vstupe sústavy merať skutočnú hodnotu integračnej zložky a porovnávať ju s integračnou zložkou v regulátore. Pri odchýlke medzi hodnotami dochádza na základe spätnej väzby eliminácie k vyrovnaniu rozdielu, a tým aj k zabráneniu pôsobenia Wind-up javu pri zmene požadovanej hodnoty. Druhým spôsobom je prípad, kedy nemôžeme na vstupe sústavy merať skutočnú hodnotu integračnej zložky. V tomto prípade musíme zistiť medze nasýtenia integračnej zložky v koncových polohách systému a zabezpečiť, aby nedošlo k ich prekročeniu. Tento druhý spôsob využívame v našom programe, kde sme pomocou sledovania integračnej zložky v koncových bodoch (poloha elevácie a azimutu) sledovali hodnoty integračnej zložky. K týmto sledovaným hodnotám sme pridali určitú toleranciu v podobe väčšieho rozsahu a pomocou programového prvku, kde sa nastavuje horná a dolná hranica výstupu sme obmedzili integračnú zložku.

5 NÁVRH LABORATÓRNEJ ÚLOHY

Laboratórne úlohy zamerané na výuku dynamických systémov, do ktorých spadá aj model helikoptéry navrhujeme pre bakalárske i magisterské štúdium nasledovne. Úlohy sú rovnaké pre oba typy štúdia, kde sa odlišujú hlavne v bode č.2: Identifikácia a návrh regulátorov.

Laboratórna úloha pre bakalárske štúdium je zameraná na **riadenie** modelu helikoptéry pomocou navrhnutých regulátorov metódou Zieglera a Nicholosa, kedy nepotrebujeme poznať sústavu, na ktorú navrhujeme regulátor. Sme schopní navrhovať regulátory na základe kritického zosilnenia a periódy netlmených kmitov.

Keďže v magisterskom štúdiu je vyučovaná aj **identifikácia** systémov, úloha je k tomu prispôbená. Študent musí najskôr previesť identifikáciu modelu helikoptéry, získať sústavu modelu a následne metódou frekvenčných charakteristík navrhnuť regulátor.

5.1 Zadanie

1. Prevedte kalibráciu modelu helikoptéry v programovom prostredí (záložka *Kalibrácia*) a overte jej správnu funkčnosť.
2. Identifikácia a návrh regulátorov:
 - (a) Prevedte identifikáciu v rovine elevácie a azimutu pomocou programového rozhrania (záložka *Identifikácia*) a identifikačného nástroja MATLABu. Zhodnoďte pôsobenie vzájomnej krížovej väzby medzi rovinami. Na základe získaných sústav navrhnite PID regulátor metódou frekvenčných charakteristík pre rovinu elevácie a azimutu.
 - (b) Pre rovinu elevácie a rovinu azimutu určte kritické zosilnenie a periódu netlmených kmitov. Pomocou metódy Zieglera a Nicholosa navrhnite PID regulátor pre rovinu elevácie i azimutu. Zhodnoďte pôsobenie vzájomnej krížovej väzby medzi rovinami. Zhodnoďte vplyv jednotlivých zložiek (P, I, D) PID regulátora.
3. V programovom prostredí (záložka *Riadenie*) overte funkčnosť navrhnutých regulátorov. Pre navrhnuté regulátory v rovine elevácie a azimutu zaznamenajte do grafov prechodové charakteristiky. Uhol meňte v okolí pracovného bodu (elevácia: -20° až 20° , azimut: -30° až 30°).
4. Pre rovinu azimutu sledujte pôsobenie integračnej zložky regulátora a navrhnite rozsah hodnôt tak, aby došlo k eliminácii Wind-up javu.

5.2 Vypracovanie

1. Kalibráciu modelu helikoptéry sme previedli na základe programového prostredia (záložka *Kalibrácia*), kde sme postupovali podľa pokynov uvedených na obrazovke a po ich dokončení sme overili na grafických prvkoch či sa pri zmene polohy modelu v rovine elevácie a azimutu zobrazujú správne hodnoty natočenia/naklonenia modelu helikoptéry. Pre rovinu elevácie sa zobrazoval uhol v rozmedzí -75° až 75° a pre rovinu azimutu -175° až 175° . Keby to tak nebolo, museli by sme pomocou tlačidla *Nuluj pulzy* vynulovať počítadlá a zopakovať celý postup kalibrácie odznova.
2. Identifikácia a návrh regulátorov:
 - (a) Postup identifikácie (viď. kapitola 4.4.2). Zhodnotenie pôsobenia krížovej väzby (viď. kapitola 4.3). Návrh regulátora pomocou metódy frekvenčných charakteristík (viď. kapitola 4.7.2).
 - (b) Určenie kritického zosilnenia, periód netlmených kmitov a návrh regulátorov pomocou metódy Zieglera a Nicholsa (viď. kapitola 4.7.1). Zhodnotenie pôsobenia krížovej väzby (viď. kapitola 4.3). Zhodnotenie jednotlivých zložiek PID regulátora (viď. kapitola 4.5.1).
3. Pre navrhnuté regulátory z bodu 2.(a) sme overili funkčnosť navrhnutých regulátorov. Prechodové charakteristiky pri zmene žiadanej hodnoty sme vyniesli do grafov pre rovinu elevácie (viď. obrázok 4.20) a rovinu azimutu (viď. obrázok 4.21).

Pre navrhnuté regulátory z bodu 2.(b) sme taktiež overili funkčnosť navrhnutých regulátorov. Prechodové charakteristiky pri zmene žiadanej hodnoty sme vyniesli do grafov pre rovinu elevácie (viď. obrázok 4.15) a rovinu azimutu (viď. obrázok 4.16).
4. Wind-up jav je spôsobený v dôsledku nasýtenia akčnej veličiny integračnej zložky regulátora. V prípade, kedy nemôžeme na vstupe sústavy merať skutočnú hodnotu integračnej zložky, musíme zistiť medze nasýtenia integračnej zložky a koncových polôh systému a zabezpečiť, aby nedošlo k ich prekročeniu. Sledovaním integračnej zložky v koncových bodoch roviny elevácie sme zistili nasýtenie akčnej veličiny pre krajné hodnoty 346 a 503. Po uvážení, že tieto hodnoty sa netýkajú len krajných polôh, ale celého rozsahu v rovine azimutu, pridáme k týmto hodnotám určitú toleranciu a hodnoty pre omedzenie Wind-up javu navrhujeme na 300 a 550.

ZÁVER

Cieľom našej práce bolo zoznámenie sa s existujúcim modelom helikoptéry, vytvorenie riadenia pomocou platformy CompactRIO a navrhnutie laboratórnych úloh, zameraných na riadenie a identifikáciu pre vybrané predmety bakalárskeho a magisterského štúdia.

V prvých krokoch sme sa museli zoznámiť so súčasným modelom helikoptéry a samotného programovacieho prostredia LabVIEW pre platformu CompactRIO. Po úspešnom zapojení všetkých hardvérových komponentov a založení nového projektu sme začali vytvárať prvé kroky k vytvoreniu riadenia modelu helikoptéry.

Prvotným úspechom bolo získavanie pulzov z rotačného inkrementálneho čidla, z ktorých sme na základe napísaného algoritmu dokázali určovať uhol naklonenia, či natočenia modelu helikoptéry. Ďalšie kroky viedli k ovládaniu motorov, na ktorých sú pripevnené vrtule. Museli sme vytvoriť pulzne-šírkovú moduláciu slúžiacu na zmenu veľkosti napätia privádzaného do motorov, a tým aj samotné otáčky motorov. Inšpiráciou boli vytvorené príklady samotného programu LabVIEW, ktorých modifikáciou sme dostali plne funkčnú pulzne-šírkovú moduláciu. Nasledovali pokusy o riadenie modelu pomocou už vytvorených PID regulátorov, obsiahnutých v programe LabVIEW. Tieto regulátory sa ukázali ako nevhodné, pretože sme nevedeli ako presne fungujú a aké rovnice, či obmedzenia používajú ku svojim výpočtom. Tieto aspekty viedli k tvorbe vlastného regulátora, ktorý pracoval podľa našich očakávaní a obsahoval i prvok k eliminácii Wind-up javu.

Po vytvorení všetkých programových komponentov nasledovalo experimentálne nastavenie regulátorov k vyskúšaniu funkčnosti modelu a overeniu správneho smerovania vývoja riadenia modelu helikoptéry. Nastavenie bolo úspešné a my sme dokázali nastaviť model helikoptéry do požadovaného uhla naklonenia či natočenia v rovine elevácie i azimutu. Po overení sme naše skúmanie nasmerovali k identifikácii modelu. Na základe vstupnej skokovej zmeny hodnoty pulzne-šírkovej modulácie (otáčky motorov) a výstupnej zmeny pulzov inkrementálneho enkóderu (uhol natočenia/naklonenia) sme mali dostatok dát k vykresleniu prechodovej charakteristiky. Pomocou identifikačného nástroja v MATLAbE sme získali sústavu systému. Tu nastali komplikácie, kvôli nelinearite typu trenia pre rovinu azimutu, ktorá ani po výmene ložísk úplne nevymizla. Ďalšiou zaujímavosťou bola krížová väzba pôsobiaca medzi rovinou elevácie a rovinou azimutu. Kým pri návrhu regulátorov tieto krížové väzby považujeme za poruchy, pri identifikácii roviny azimutu je táto väzba dôležitou súčasťou. Protisila pôsobiaca z krútiaceho momentu motoru elevácie nám dovoľovala identifikovať sústavu elevácie.

Získaním sústavy pre rovinu elevácie i pre rovinu azimutu sme pristúpili k samotnému návrhu regulátorov. Prvou metódou návrhu bola metóda frekvenčných

charakteristík otvoreného regulačného obvodu. V nástroji Sisotool a pravidiel pre návrh pomocou frekvenčných charakteristík sme si pre naše sústavy navrhli regulátory. Pre regulátor roviny elevácie nebolo potrebné prevádzať žiadne dodatočné zmeny, regulácia fungovala korektne. Pre rovinu azimutu sme museli doladiť zosilnenie, pretože pri identifikácii sme vytvárali protisilu umelo a to sa prejavilo nesprávne určeným statickým zosilnením sústavy. Navrhnuté regulátory sú uvedené v tabuľke 4.3 a odozvy pre zmenu požadovaného uhlu nájdeme v grafoch 4.20 a 4.21. Druhou metódou návrhu bola v praxi hojne využívaná metóda Zieglera a Nicholosa, kedy sme priviedli model na hranicu stability. Pomocou kritického zosilnenia a periódy netlmených kmitov sme na základe Zieglerovej a Nicholsovej tabuľky určili koeficienty regulátorov. Navrhnuté regulátory sú uvedené v tabuľke 4.2 a odozvy pre zmenu požadovaného uhla nájdeme v grafoch 4.15 a 4.16. Metóda frekvenčných charakteristík vedie k pomalšiemu regulačnému deju, ale nenastávajú také prekmity ako pri metóde pomocou Zieglera a Nicholosa.

Po uvedení modelu helikoptéry do funkčného stavu bolo treba upraviť program tak, aby bol užívateľsky prijateľný. Ovládacie prvky sú rozdelené do troch podokien, kde každé okno je zamerané na inú funkciu a jeden postranný panel s popisom a hlavnými tlačidlami pre riadenie helikoptéry. Prvé okno slúži ku kalibrácii uhlov natočenia, druhé ku identifikácii a tretie k regulácii modelu helikoptéry.

Návrh laboratórnych úloh je vytvorený tak, aby vyhovoval ako pre bakalárske, tak i pre magisterské štúdium s ohľadom na obsah vyučovaných predmetov. Úloha je stavaná podobne pre oba typy štúdia (kalibrácia, eliminácia Wind-up javu) s tým, že časť úlohy pre bakalárske štúdium je zameraná na riadenie a magisterská časť je zameraná na identifikáciu modelu helikoptéry.

LITERATÚRA

- [1] FEEDBACK INSTRUMENTS. *Twin Rotor MIMO System: ADVANCED TEACHING MANUAL 1* [anglický]. Park Road, Crowborough, E. Sussex, UK [cit. 2012-12-22]. Dostupné z: <http://doc.es.aau.dk/fileadmin/doc.kom.aau.dk/labs_facillities/control/manuals/330074M5.PDF>
- [2] JOHAN ASTRÖM, Karl. DEPARTMENT OF MECHANICAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING UNIVERSITY OF CALIFORNIA. *Control System Design: Lecture Notes for ME 155A* [online]. Santa Barbara, 2002 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <<http://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa02/caltech/astrom-ch6.pdf/>>
- [3] BOBÁK, Vladimír, Josef BÖHM, Roman PROKOP a Jaromír FESSL. *Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátorů: Algoritmy a implementace*. 1. vyd. Brno: VUTUM, 1999. ISBN 80-214-1299-2.
- [4] NATIONAL INSTRUMENTS. *CompactRIO Integrated System with Real-time Controller and Reconfigurable Chassis: Data sheet*[online]. 2013 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-354/lang/cs>>
- [5] NATIONAL INSTRUMENTS. *C Series Motion Module for CompactRIO: Data sheet*[online]. 2013 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/products/us/cat_crio_9505.pdf>
- [6] NATIONAL INSTRUMENTS. *C Series Digital I/O Module: Data sheet*[online]. 2013 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-86/lang/cs>>
- [7] NATIONAL INSTRUMENTS. *What is a Real-time Operation System? (RTOS): Developer zone*[online]. 2013 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <<http://www.ni.com/white-paper/3938/en#toc2>>
- [8] NATIONAL INSTRUMENTS. *National Instrument*[online]. 2012 [cit. 2013-12-28]. Dostupné z: <<http://www.ni.com>>
- [9] SCAV. BRÁZDA PAVEL. *Scav*. [online]. 2012-09-01, 2013-04-01 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: <http://www.scav.cz/obchod/e-shop/specifikace/prumyslove_zdroje/prumyslovyy_zdroj_JS-100.htm>
- [10] Conrad. *Conrad* [online]. 2013-03-05 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <<http://www.conrad.com/ce/en/product/383710/Power-40045>>

- [11] BLAHA, Petr a Petr VAVŘÍN. *Řízení a regulace I: Základy regulace lineárních systémů - spojité a diskrétní*. Skriptum. VUT Brno.
- [12] LARM. *Larm a.s* [online]. 2010 [cit. 2013-05-05]. Katalógový list. Dostupné z: <http://www.martsk.sk/cd/larm/larm0403.pdf>
- [13] KOZÁK, Štefan. *Riadenie lineárnych systémov: Návrh regulátorov pomocou logaritmicko-frekvenčných charakteristík*. Bratislava, 2012. Dostupné z: http://www.kasr.elf.stuba.sk/predmety/rls/Prednasky/RLS_04_LFCH_stavovy%20p.pdf. Prednáška. Slovenská technická univerzita v Bratislave.

ZOZNAM VELIČÍN

Veličina	Popis	Značka jednotky
l	dĺžka	m
M	krútiaci moment	Nm
m	hmotnosť	kg
g	gravitačné zrýchlenie	$m \cdot s^{-2}$
F	sila	N
α	uhol	$^{\circ}$
ω	uhlová rýchlosť	$rad \cdot s^{-1}$
U	elektrické napätie	V
I	elektrický prúd	A
f	frekvencia	Hz

ZOZNAM SKRATIEK

PWM	Pulzne-šírková modulácia (z anglického pulse-width modulation).
PID	Proporcionálne-integračne-derivačný (zvyčajne regulátor).
MATLAB	Interaktívne prostredie pre výpočty, vizualizáciu a programovanie.
FPGA	Konfigurovateľné hradlové pole.
SISOTOOL	Interaktívny nástroj pre prácu so spätnoväzobnými obvodmi.

A FOTODOKUMENTÁCIA

A.1 Reálny model helikoptéry



Obr. A.1: Reálny model helikoptéry.

B UŽÍVATELSKÉ PROSTREDIE

B.1 Kalibrácia

Kalibrácia Identifikácia Riadenie

Kalibrácia uhlu naklonenia (natočenia) prebieha na základe vytvoreného algoritmu, ktorý získava aktuálne pulzy z inkrementálneho enkóderu. Zistí uje maximálnu a minimálnu hodnotu pulzov a za pomoci matematických výpočtov pri známej skutočnej hodnote naklonenia - 150° (natočenia - 350°) vieme určiť pomer pulzov na jeden stupeň. Aktuálne naklonenie (natočenie) získame vynásobením získaného pomeru hodnotou aktuálnych pulzov.

Pre kalibráciu je potrebné:

1. Zastabilizovať helikoptéru a vynulovať pulzy pre zvolenú rovinu pomocou tlačidla **nuluj**
2. Manuálne posunúť model helikoptéry do krajných polôh. (dve polohy pre azimut i eleváciu)

Spätná kontrola:
Helikoptéra pri pohybe zobrazuje uhol natočenia v rozmedzí -75° až 75° pre rovinu elevácie a -175° až 175° pre rovinu azimutu.

RIADENIE MODELU HELIKOPTÉRY

ELEVÁCIA

0 celkový počet impulzov elev.

0 počet impulzov na stupeň

0 polovica impulzov elev.

0 aktuálne pulzy elev.

AZIMUT

0 celkový počet impulzov azim.

0 počet impulzov na stupeň azim.

0 polovica impulzov azim.

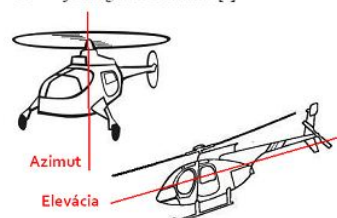
0 aktuálne pulzy azim.

PWM strieda - elevácia

PWM strieda - azimut

$$u(k) = K_c \left(e(k) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_d}{T_s} (e(k) - e(k-1)) \right)$$

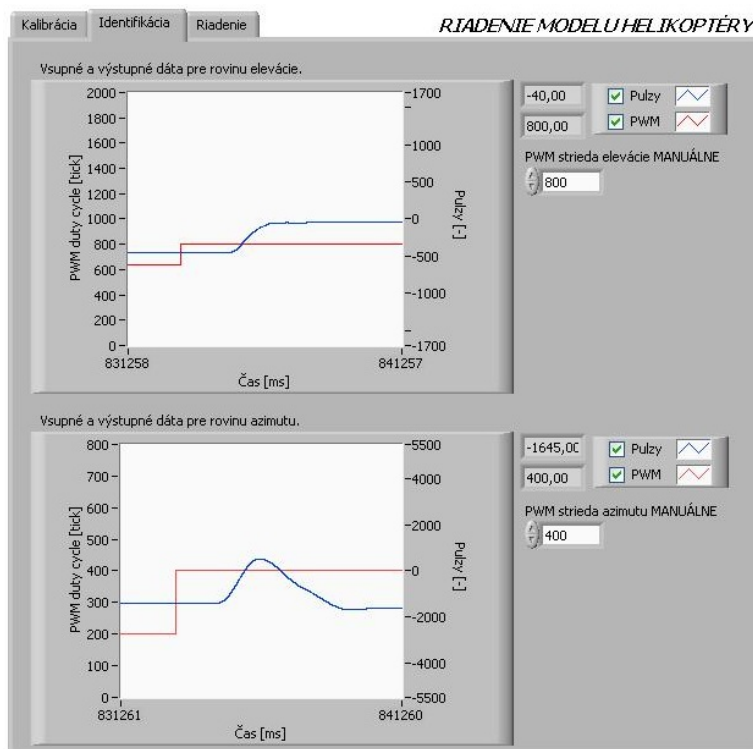
$e(k)$ je regulační odchylka v normovaném tvaru
 K_c je zesílení [-]
 T_s je perioda vzorkování [s]
 T_d je derivační konstanta [s]
 T_i je integrační konstanta [s]



vzorkovacia perióda

Ts[ms]

B.2 Identifikácia

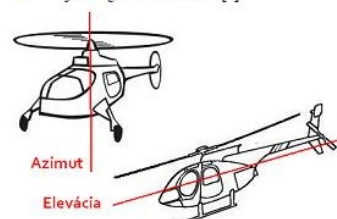


PWM strieda - elevácia

PWM strieda - azimut

$$u(k) = K_c \left(e(k) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_d}{T_s} (e(k) - e(k-1)) \right)$$

$e(k)$ je regulační odchylka v normovaném tvaru
 K_c je zesílení [-]
 T_s je perioda vzorkování [s]
 T_d je derivační konstanta [s]
 T_i je integrační konstanta [s]



vzorkovacia perióda

Ts[ms]

B.3 Riadenie

Kalibrácia Identifikácia **Riadenie**

RIADENIE MODELU HELIKOPTÉRY

☒ Zapnutie MANUÁLNEJ regulácie

☒ Zapnutie motoru ELEVÁCIE

633 PWM strieda - elevácia

☒ Zapnutie motoru AZIMUTU

252 PWM strieda - azimut

Uhol elevácie.

Uhol azimutu.

PID ELEVÁCIA

0,29 Kp

0,41 Ti

0,16 Td

0 Požadovaný uhol [°] elevácia

0,52 Skutočný uhol [°] elevácia

834,602 Hodnota integračnej zložky

☒ Nuluj integračnú zložku

PID AZIMUT

0,25 Kp

1,5 Ti

0,97 Td

30 Požadovaný uhol [°] azimut

30,37 Skutočný uhol [°] azimut

250,924 Hodnota integračnej zložky

☒ Nuluj integračnú zložku.

$$u(k) = Kc \left(e(k) + \frac{T_s}{Ti} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{Td}{Ts} (e(k) - e(k-1)) \right)$$

$e(k)$ je regulační odchylka v normovaném tvaru
 Kc je zesílení [-]
 Ts je perioda vzorkování [s]
 Td je derivační konstanta [s]
 Ti je integrační konstanta [s]

STOP

vzorkovacia perióda

1 Ts[ms]