

## Riadenie komplexného elektro-mechanického systému

K Draganová<sup>1</sup>, M Laššák<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Katedra leteckej technickej prípravy, Letecká fakulta, Technická univerzita Košice, Rampová 7, Košice, Slovakia

<sup>2</sup> Flight Controls CoE, Honeywell Technology Solutions, Inc., Tuřanka 100, Brno, Czech Republic

E-mail: katarina.draganova@tuke.sk, miroslav.lassak@honeywell.com

### Anotace:

Elektro-mechanické servopohony sa používajú ako v klasickom letectve, tak aj pri riadení modelov lietadiel pri ovládaní riadiacich plôch, alebo ako pohony pre kamerové plošiny. Dopravné oneskorenie je nepriaznivý fakt, s ktorým je nutné počítať pri využití väčšiny pohonov v priemysle. Pri návrhu regulačných obvodov, prítomné dopravné oneskorenie sťažuje regulačný proces a mnohokrát ani neumožňuje využiť klasické PID regulátory navrhnuté bežnými metódami. Článok sa zaoberá a bližšie opisuje návrh otvoreného a spätno-väzobného regulačného obvodu pre kompenzáciu dopravného oneskorenia modelárskeho servopohonu použitého pre stabilizáciu kamerovej plošiny na bezposádkovom dopravnom prostriedku (UAV-Unmanned Aerial Vehicle).

### Anotation:

Electro-mechanical servoactuators are widely used not only in the classical aviation but also in the area of small unmanned aerial vehicles. They are commonly used for actuation of control surfaces or in stabilized camera gimbals. A transport delay is a negative effect present in most actuators, and it needs to be taken into account. In the process of control algorithm design, the transport delay makes regulation more complicated and many times makes it impossible to use PID controllers designed with basic methods. This article deals with the design of open-loop and closed-loop control algorithms intended for the modeler servoactuator's transport delay compensation used for unmanned aerial vehicles' (UAV) camera gimbal stabilization.

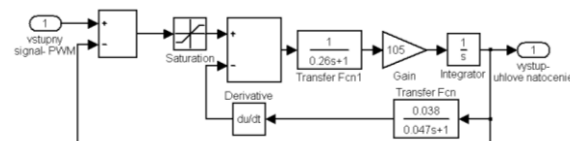
## ÚVOD

Bezposádkové dopravné prostriedky (UAV) sú v dnešnej dobe masovo využívané v civilnom sektore okrem zábavy, hlavne pre zhotovovanie fotografických snímok a videozáznamov [1-2]. Ich rozsiahle využitie vyplýva najmä z ich nízkej nadobúdacej ceny a prevádzkových nákladov. Pre zhotovovanie videozáznamov je potrebné osadiť UAV stabilizovanou plošinou s kamerovým systémom. Ako pohon sa v kamerových servorámoch využívajú hlavne modelárske servomotorčeky alebo nízkootáčkové bezkartáčové (BLDC- brushless direct current) motory. Tak ako pri veľkom počte reálnych procesov v priemysle, aj pri servopohonoch, je prítomné dopravné oneskorenie, ktoré môže byť spôsobené napr. rozmermi zariadenia, alebo aj oneskorením akčných členov [3]. Prítomné dopravné oneskorenie v regulačnom obvode značne sťažuje regulačný proces. Riešenie spočíva v implementácii korekčných slučiek alebo v obvodech pre kompenzáciu dopravného oneskorenia.

## SIMULAČNÝ MODEL

Pre 4-motorový UAV (kvadrokoptér) vyvíjaný na Katedre leteckej technickej prípravy Leteckej fakulty v Košiciach (KLTP LF) bol zvolený servorám s dvomi stupňami voľnosti, ktorý bol osadený servopohonmi POWER HD 1209 TH. Pre simulačné potreby bol experimentálnymi metódami zostrojený

nelineárny model servopohonu – obr. 1, ktorý je bližšie popísaný v [3]. Servopohon sa počas pohybu správa ako integračný článok: integruje rýchlosť pohybu až po dosiahnutie nastaveného uhlového natočenia, pri rozbehu a dobehu serva sa značne prejavuje aj vplyv zotrvačnosti. Z praktických meraní bolo identifikované dopravné oneskorenie (namodelované pomocou bloku Transport Delay)  $T_d=0,02$  s. Následne bol vytvorený komplexný matematický model celej plošiny, ktorý zohľadňoval dynamiku plošiny (závisí od vlastností servopohonu) ale aj mechanické prevody.



Obr. 1: Simulačná schéma servopohonu POWER HD 1209 TH

Keďže je zvolený systém nelineárny, proces návrhu vhodného regulátora, potrebného pre riadenie a stabilizáciu plošiny, nie je jednoduchý. Informácia o poruche, uhle natočenia plošiny, sa v skutočnej aplikácii, na stabilizovanej kamerovej plošine, určuje na základe inerciálnych senzorov: akcelerometrov a gyroskopov. Pozdĺžny sklon a priečny náklon je určený po predspracovaní dát (kľzavým mediánovým filtrom) a fúzií informácií z akcelerometrov a gyroskopov pomocou Komplementárneho filtra [3-5]. Keďže plošina je systém s dopravným oneskorením a na výstupe komplementárneho filtra je

estimovaný uhol natočenia, ktorý je tiež časovo oneskorený, spätnoväzobné riadenie je značne sťažené.

Pre vyhodnotenie kvality navrhnutých algoritmov riadenia boli vypočítané nasledovné štatistické ukazovatele kvality:

**MAE** – Mean Absolute Error- stredná hodnota absolútnej chyby,

**MAPE** - Mean Absolute Percentage Error- stredná percentuálna hodnota absolútnej chyby,

**KICH** -Kvadratická Integrálna Chyba.

Podrobnejší popis ukazovateľov kvality je uvedený v [3, 6].

## RIADENIE

### Inverzný model

Prvou možnosťou riadenia servorámu, ktorá bola simulačne a aj prakticky realizovaná, je inverzný matematický model [3]. Inverzný matematický model je založený na inverznej funkcii k prenosovej funkcii použitého servomotorčeka, je najjednoduchší na zostrojenie, jednoduchý pre implementáciu do palubného mikrokontroléra a realizáciu v reálnom čase a spoľahlivý v prevádzke.

Princíp inverzného modelu (IM) je nasledovný: v ustálených režimoch sa určia hodnoty zosilnenia  $K$  ako podiel hodnoty uhla natočenia plošiny a hodnoty riadiaceho signálu servopohonu, PWM (Pulse width modulation).

$$K = \frac{\mathcal{G}_p(\infty)}{PWM} \quad (1)$$

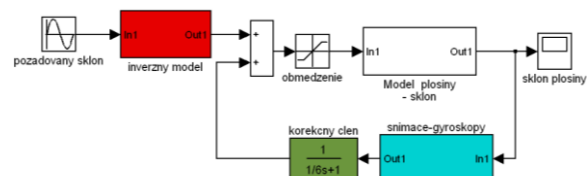
kde  $K$  - zosilnenie,  $\mathcal{G}_p(\infty)$  - ustálená hodnota uhla natočenia plošiny (pozdĺžny sklon),  $PWM$  - riadiaci signál.

Po vynásobení hodnoty požadovaného uhla natočenia plošiny  $\mathcal{G}_p(\infty)$  prevrátenou hodnotou zosilnenia  $1/K$ , dostaneme hodnotu riadiaceho signálu  $PWM$ , ktorý je potrebné priviesť na servopohon [3].

$$\mathcal{G}_p(\infty) \frac{1}{K} = \mathcal{G}_p(\infty) \frac{PWM}{\mathcal{G}_p(\infty)} = PWM \quad (2)$$

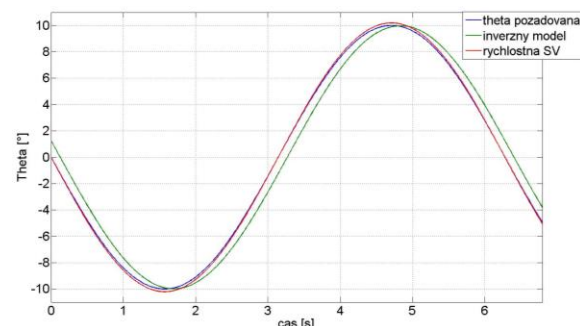
V prostredí Matlab Simulink bol zostrojený adaptívny inverzný model, ktorého zosilnenie sa automaticky menilo v závislosti od aktuálneho polohového uhla v príslušnom kanáli plošiny. Výhodou tohto algoritmu riadenia je jeho jednoduchosť. Riadenie pomocou inverzného modelu nevyžaduje znalosť dynamického správania sa systému (teda prenosu celého nelineárneho systému). Pre návrh inverzného modelu postačuje znalosť statických zosilnení v jednotlivých pracovných bodoch.

Keďže daný regulátor spadá do kategórie otvorených regulačných obvodov, neurčuje sa regulačná odchýlka ako rozdiel požadovanej a nameranej hodnoty uhla natočenia plošiny, a preto nie je dostatočne robustný. K urýchleniu regulačného procesu sa pristúpilo pomocou rýchlostnej spätnej väzby (RSV), ktorá spočívala v privedení signálu z gyroskopov, ktoré reagujú okamžite na natočenie plošiny, do sumačného člena a pripočítaní k požadovanému uhlu natočenia.



Obr. 2: Simulačná schéma IM s rýchlostnou spätnou väzbou

Činnosť navrhnutého riadiaceho algoritmu bola simulačne overená pri rôznych vstupných signáloch: skoková zmena vstupného signálu, sinusový signál, postupnosť impulzov, kde bola overená správna činnosť a stabilita regulátora ako aj vysoká presnosť. Z výsledkov dosiahnutých pri simulácii so vstupným sinusovým signálom s amplitúdou  $10^\circ$  (Obr. 3) vyplýva, že pri spätnoväzobnej korekcii s rýchlostnou spätnou väzbou (RSV) bolo dosiahnuté oneskorenie medzi požadovanou a skutočnou hodnotou uhlového natočenia len 60 ms (bez RSV dosiahlo oneskorenie až 130 ms).



Obr. 3: Overenie inverzného modelu

Tab. 1 Štatistické ukazovatele kvality pre IM

	MAE[°]	MAPE [%]	KICH
<b>IM</b>	0,7844	0,6693	6,5111
<b>IM s RSV</b>	0,1245	0,0484	0,5120

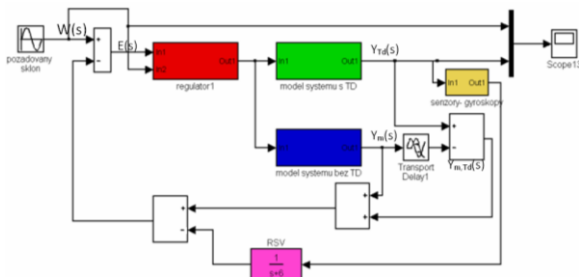
Na základe grafickej ilustrácie ako aj štatistických ukazovateľov kvality pri riadení založenom na inverznom modeli, je možné skonštatovať, že pomocou spätnoväzobnej korekcie vo forme RSV došlo k skvalitneniu regulačného procesu. Regulačný proces sa značne urýchlil a to sa prejavilo najmä na znížení kvadratickej integrálnej chyby KICH. Vyššie opísaný riadiaci algoritmus bol implementovaný do

palubného mikrokontroléra mbed NXP LPC1768 a prakticky overený na reálnej kamerovej plošine. Výsledky stabilizácie kamerovej plošiny boli postačujúce.

### Smithov prediktor

Riešenie problému riadenia systémov s dopravným oneskorením prinášajú rozvetvené regulačné obvody s kompenzáciou dopravného oneskorenia-Smithov prediktor (SP). Pri aplikovaní Smithovho prediktora sa regulačná odchýlka určuje ako rozdiel požadovanej hodnoty a hodnoty získanej na výstupe z matematického modelu systému - kamerovej plošiny. [7]

Smithov prediktor (bloková schéma na Obr. 4.) vychádza z predpokladu, že je k dispozícii zostrojený simulačný model, ktorý dostatočne verne popisuje riadený proces. Simulačný model pozostáva z modelu procesu bez dopravného oneskorenia a modelu dopravného oneskorenia. Presnosť kompenzácie dopravného oneskorenia je závislá od presnosti matematického modelu. Po prvotných simuláciách samotného Smithovho prediktora sa do simulačnej schémy, pre zlepšenie dynamických vlastností, doplnila rýchlostná spätná väzba. Výsledkom bol spätnoväzobný regulačný obvod pre systém s dopravným oneskorením, ktorého dynamické vlastnosti boli porovnateľné, dokonca lepšie ako boli dosiahnuté s inverzným modelom s rýchlostnou spätnou väzbou. Výhoda Smithovho prediktora oproti inverznému modelu spočíva v jeho spätnej väzbe, a teda skutočnej informácii o uhlovom natočení plošiny, ktorá v ustálenom stave zaručí nulovú trvalú regulačnú odchýlku.



Obr. 4: Smithov prediktor s rýchlostnou spätnou väzbou

Pre regulačnú odchýlku  $E(s)$  platí:

$$E(s) = W(s) - Y_m(s) + Y_{m,Td} - Y_{Td} + \dot{\theta}_p \quad (3)$$

Kde:  $W(s)$ - požadovaný sklon,  $Y_m(s)$ - výstup modelu systému bez dopravného oneskorenia,  $Y_{m,Td}$ - výstup modelu dopravného oneskorenia,  $Y_{Td}$  - výstup modelu systému s dopravným oneskorením,  $\dot{\theta}_p$  - uhlová rýchlosť (zmena uhla pozdĺžneho sklonu)

Ak je model systému bez dopravného oneskorenia a model dopravného oneskorenia presný, tak

$$Y_{m,Td} = Y_{Td} \quad (4)$$

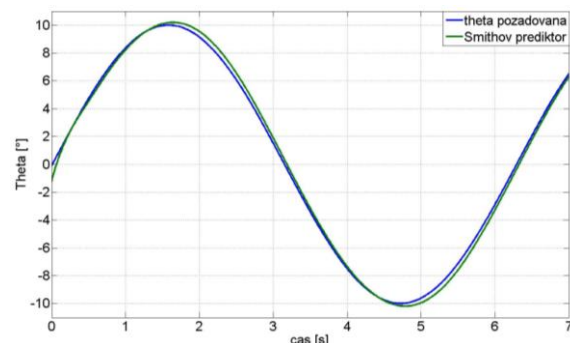
$$E(s) = W(s) - Y_m(s) \quad (5)$$

$$E(s) = W(s) - G_{s,model} U(s) \quad (6)$$

kde:  $U(s)$  - akčný zásah,  $G_{s,model}$  - prenos modelu servopohonu

V časovej oblasti to znamená, že  $e(t) = w(t)$ , teda odozva na vstup generovaný v čase  $t$ . Nedostatkom tohto riešenia je, že v regulačnej odchýlke, ktorá je vstupom do regulátora, nie je odozva systému na vstup generovaný v čase  $t$  od reálneho procesu, ale od modelu [7].

Pre Smithov prediktor boli experimentálne navrhnuté PI regulátory pre niekoľko pracovných bodov: pre hodnoty uhlov pozdĺžneho sklonu  $-20^\circ$  až  $+20^\circ$  s krokom  $5^\circ$ . Následne bol navrhnutý adaptívny regulátor, ktorého hodnoty proporcionálneho a integračného zosilnenia sa automaticky nastavovali podľa požadovanej hodnoty sklonu prípadne náklonu.



Obr. 5: Overenie Smithovho prediktora

MAE=0,2849°; MAPE=0,1853 %; KICH=4,3889

Regulátor vypočítaný pre Smithov prediktor bol simulačne overený (viď Obr. 5) na základe čoho sa dospelo k záveru, že regulátor pracoval správne, pričom oneskorenie medzi požadovanou a nastavenou hodnotou uhlového natočenia dosiahlo maximálnu hodnotu 120 ms. Systém je stabilný a ani pri skokových zmenách vo vstupnom signáli sa nerozkmitáva.

## ZÁVER

Pre obvod s dopravným oneskorením (servopohony využité na kamerovej plošine) boli navrhnuté dva regulačné algoritmy: otvorený regulačný obvod so zavedenou spätnoväzobnou rýchlostnou korekciou zazaložený na inverznom modeli a obvod pre kompenzáciu dopravného oneskorenia, Smithov prediktor. Obe dva riadiace algoritmy boli simulačne overené a inverzný model aj prakticky implementovaný a úspešne overený. Oneskorenie medzi požadovanou a nastavenou hodnotou dosiahlo pri inverznom modeli s rýchlostnou korekciou

maximálnu hodnotu 60 ms a pri Smithovom prediktore 120 ms. Stredná percentuálna hodnota absolútnej chyby dosiahla pri inverznom modeli len 0,0484 % a pri Smithovom prediktore hodnotu 0,1853 %. Simulačným overením sa dokázala správna činnosť oboch navrhnutých regulačných obvodov.

## LITERATURA

- [1] K. Draganová, P. Lipovský, R. Sabol, "Current trends in area of UAV," New Trends in Aviation Development: proceedings of the 9th international scientific conference: Gerlachov - High Tatras, September 16.-17. 2010, Slovak Republic. - Košice : TU, 2010 S. 42-47. - ISBN 978-80-553-0475-5
- [2] V. Moucha, K. Draganová, "UAV – Robotická avionická platforma na riešenie bezpečnostných aplikácií," Bezpečné Slovensko a Európska únia :zborník príspevkov z 4. medzinárodnej vedeckej konferencie, Košice: 11. - 12. november 2010. VŠBM, 2011 S. 356-364. - ISBN 978-80-89282-44-9
- [3] M. Laššák, Riadenie objektu s multisenzorovým snímacím systémom, dizertačná práca, Košice: TU, LF - 2014. - 125 s.
- [4] P. Lukáč, K. Draganová, P. Gonda, J. Blažek, J. Hudák, "Inerciálny systém a jeho kalibrácia s využitím štatistických metód spracovania signálov" 1 elektronický optický disk (CD-ROM). Nové smery v spracovaní signálov 10 : zborník príspevkov z medzinárodnej vedeckej konferencie : 26.-28.5.2010, Tatranské Zruby. - Liptovský Mikuláš : Akadémia ozbrojených síl, 2010 S. 167-174. - ISBN 978-80-8040-399-7
- [5] T. Vaispacher, R. Bréda, R. Andoga, "Integration architecture design for implementation of a vector magnetometer on board of unmanned vehicle", CINTI 2014 : 15th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics : Proceedings : November 19-21, 2014, Budapest. - Danvers : IEEE, 2014 P. 483-489. - ISBN 978-1-4799-5337-0
- [6] L. Madarász, M. Bučko, L. Fözö, R. Andoga, Základy automatického riadenia. Elfa, s.r.o., TU Košice, 2010, ISBN 978-80-8086-162-9.
- [7] Bakošová, M. RRO\_prednaska [online]. Bratislava: Slovenská technická univerzita, STUBA, 2009, [cit. 25-02-2013]. Dostupné z WWW: <[http://www.kirp.chtf.stuba.sk/~bakosova/www/RTP/rro\\_prednaska.pdf](http://www.kirp.chtf.stuba.sk/~bakosova/www/RTP/rro_prednaska.pdf)>.