

# THE EXPERIMENTAL APPARATUS FOR MEASUREMENT OF CHARACTERISTICS OF MAN-OPERATOR OF SPECIAL MAN-MACHINE SYSTEM

## V. Čech<sup>\*</sup>, J. Jevický<sup>†</sup>

**Summary:** This paper follows-up our papers which were published in IM 2004 and IM 2005 proceedings. The structure of the experimental apparatus software is presented in this paper. The experiments, which will realize with using of this apparatus, make possible to improve the special mathematical models of manoperator. These models are necessary for control advancement of special servomechanisms – man-machine systems.

## 1. Úvod

Senzorický systém na bázi pasivního optoelektronického dálkoměru (POED) – dále SS POED – je jedním ze senzorických systémů, které mohou být používány v mechatronických systémech, speciálně pak v systémech robotických. SS POED umožňuje získávat informace o poloze jednotlivých objektů v pozorované scéně a to jak vůči SS POED, tak i navzájem. Dalším zpracováním těchto informací je možno dosáhnout tzv. vnímání hloubky scény (depth perception), to pak umožňuje plánování a realizaci akcí spojených s pohybem ve scéně celého nebo jen části mechatronického systému [1].

SS POED se obecně skládá [1] z kanálu dálky (systému rozpoznávání objektů a měření dálky k nim) a z kanálu směru (systému zamiřování a sledování cíle – vybraného objektu). V našem příspěvku se budeme zabývat problematikou spojenou s činností kanálu směru.

Pro zajištění optimální činnosti SS POED je vhodné, aby byl umístěn na svém nosiči např. robotu s využitím Cardanova závěsu se dvěma stupni volnosti (vzájemně nezávislé otáčení sdružených pelengačních os SS POED v horizontální rovině – odměrový pohyb  $\psi$  a ve vertikální rovině – náměrový (elevační) pohyb  $\varphi$ ). Uvedené uspořádání umožňuje vzájemně nezávislé pohyby nosiče resp. dopravního prostředku (DP) a pelengačního systému SS POED (obvykle dvě CCD kamery umístěné na pevné bázi s potřebným optickým a elektronickým systémem). Řízenými objekty (nezávislé řízení odměru  $\psi$  a náměru  $\varphi$ ) jsou v tomto případě pohyblivé části Cardanova závěsu (vnější a vnitřní rám) spolu s na nich umístěnými podsystémy SS POED, případně i dalšími zařízeními, která nesouvisejí s SS POED [1, 2, 6].

<sup>\*</sup> Doc. Ing. Vladimír Čech, CSc., poradce, Pavlovská 35, 623 00 Brno, e-mail: cech.vladimir@post.cz

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup> Doc. RNDr. Jiří Jevický, CSc., Univerzita obrany v Brně, Kounicova 65, 612 00 Brno, e-mail: jiri.jevicky@unob.cz

V dalším se nebudeme zabývat degenerovanými variantami kanálu směru:

 Cardanův závěs je nahrazen jediným rámem, který umožňuje řízení pouze v náměru a řízení odměru je realizováno natáčením celého nosiče resp. DP - např. mobilního robota v horizontální rovině

- pelengační systém SS POED je nepohyblivě umístěn na svém nosiči resp.DP - např. letounu, takže ke sledování cíle resp. scény je nutno manévrovat s celým DP.

Potřebné údaje k vyhodnocení regulačních odchylek (pro odměr  $\psi$  a pro náměr  $\varphi$ ) v automatickém režimu práce kanálu směru jsou poskytovány kanálem dálky, který může pracovat v automatickém i poloautomatickém režimu. V poloautomatickém režimu práce kanálu směru vyhodnocuje regulační odchylky operátor a zároveň plní funkci regulátoru polohy [1, 5].

Je-li pozorovaná scéna dostatečně složitá a dokonce i v čase proměnná, musí fázi učení SS POED realizovat operátor. V této fázi identifikuje cíl a tento v poloautomatickém režimu práce kanálu směru sleduje po takovou dobu, než podsystém automatického rozpoznávání cíle kanálu dálky zvládne svůj úkol a převezme jeho sledování. Operátor musí převzít řízení i v případě, když cíl zmizí na delší dobu za překážkami (např. křoví, úvoz, dům apod.) nebo v oblacích prachu, dýmu nebo mlhy. Z uvedeného je zřejmé, že vlastnosti a schopnosti operátora jsou kritické pro práci SS POED ve složitých podmínkách. Je tudíž vhodné doplnit systém o prvky, které zefektivňují proces učení operátora (proces dostatečně rychlého, přesného a spolehlivého zvládnutí poloautomatického režimu řízení systému – kanálu směru - operátorem) a vlastní proces řízení operátorem – sledování cíle. K vytvoření těchto prvků je nutno mít co nejvíce informací o operátorovi jako prvku regulačního obvodu [1].

Existuje dostatek literatury, která se zabývá vlastnostmi a schopnostmi operátora v obdobných systémech člověk – stroj (ergonomický systém, man-machine system). Jsou publikovány různé matematické modely popisující proces učení a chování operátora. Operátor se částečně adaptuje na jím řízenou konkrétní soustavu, proto parametry charakterizující jeho vlastnosti, které vystupují v příslušných matematických modelech, jsou platné pouze ve vztahu k této konkrétní soustavě. Nelze je proto, dost dobře, přebírat z literatury.

Je také známo, že nemá smysl zvyšovat kvalitu technické části kanálu směru pracující v poloautomatickém režimu nad určitou mez, neboť vlastnosti operátora případné další zkvalitnění soustavy stejně zcela znehodnotí. Poznání této meze je klíčové pro proces projektování kanálu směru. S tímto problémem souvisí i projektování technické části kanálu směru jako adaptivního resp. učícího se systému, neboť každý operátor se chová poněkud jinak a to v závislosti na jeho individuálních psychofyziologických vlastnostech a schopnostech, aktuálním stavu (únava, nemoc, zranění, stres atd.), pracovních podmínkách (uspořádání pracoviště, teplota, hluk, dým a prach, osvětlení atd.) a pozorované scéně resp. scénáři (složitost scény, viditelnost cíle – osvětlení, oslnění sluncem, manévr cíle a nosiče SS POED apod.).

Uvedené důvody vedly k nutnosti vytvoření simulačního zařízení (*SKS - simulátoru kanálu směru*), které umožňuje poznávat vlastnosti operátora v interakci se simulovanými vlastnostmi konkrétní technické části kanálu směru a simulovaným scénářem<sup>‡</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>‡</sup> Zakázku SKS realizovala firma SMART TECHNIK, s.r.o. ve spolupráci s dalšími firmami. Návrh koncepce provedl spoluautor příspěvku doc. V. Čech. Autoři příspěvku společně realizovali kompletní software pro SKS.

### 2. Simulátor kanálu směru - SKS

- Simulátor kanálu směru (SKS) se skládá z
- hardwarové části (HW) a
- softwarové části (SW).

HW část se skládá z

- kabiny s klimatizační jednotkou (cca -10 až +50°C), ve které je
- pracoviště operátora,
- osvětlení,
- generátor hluku a
- stroboskopická jednotka pro generaci světelných efektů.

Kabinu lze umístit na experimentální stend – simulátor náhodného (samozřejmě i deterministického) kinematického buzení (ES-SNKB, popis a vlastnosti viz [7]). V tomto případě lze poměrně věrně simulovat účinky jízdy vozidla, plavby lodi, letu letadla, případně účinků větru na poddajnou konstrukci vyzdvižené pozorovací plošiny a to za současného sledování cíle na operátora.

Pracoviště operátora se skládá z

- polohovatelné sedačky,
- stavitelných zástěn, které umožňují simulovat omezený pracovní prostor operátora,
- polohovatelného imitátoru zaměřovače,
- vyměnitelných ovladačů (joysticků) a
- počítače s vlastním LCD displejem a s příslušenstvím (+ vyhřívání pro práci za nízkých teplot).

Imitátor zaměřovače se skládá z vyhřívaného LCD displeje 17" případně 19" a dalekohledové soustavy s výměnnými adaptéry. Pomocí dalekohledové soustavy je sledován LCD displej, takže je vytvářen dojem pozorování scény pomocí reálného zaměřovače. Adaptéry (čelní opěrky, pryžové očnice (vlnovce), imitátory čelních panelů reálných zaměřovačů) imitují tvarové provedení reálného zaměřovače.

Adaptéry a konkrétní typ ovladače (joysticku) se volí v souladu se simulovaným konkrétním typem kanálu směru resp. se studovaným problémem.

Počítač je vybaven tak, že umožňuje, mimo jiné, dálkově řídit činnost ES-SNKB.

V další části příspěvku se budeme zabývat pouze SW částí simulátoru.

#### 3. Software simulátoru kanálu směru – SKS

Základní struktura SW simulátoru kanálu směru (SKS) je uvedena na obr. 1. SW se skládá ze dvou základních částí:

- modelu "okolí" (samostatný program EFG resp. novější SNBP) a

- model kanálu směru SS POED (vlastní SW simulátoru).

Program EFG resp. SNBP generuje všechna potřebná vstupní data pro práci modelu kanálu směru SS POED. Data jsou předem vypočtena jako časové řady jednotlivých parametrů a vypálena na CD ve formátu \*.txt.

Uživatel zvolí před výpočtem jednak konfiguraci (rozměry atd.) SS POED, způsob jeho umístění na nosiči resp. dopravním prostředku (DP) a jednak scénář pohybu DP a cíle jako hmotných bodů v prostoru. Pro cíl i DP lze volit režim "nepohyblivý" nebo "pohyblivý" - zatím ve variantách pohybu po přímce resp. po šroubovici s konstantní rychlostí nebo



Obr. 1 Základní struktura SW simulátoru kanálu směru (SKS)



Obr. 2 Princip zobrazení regulačních odchylek v imitátoru zaměřovače (vliv turbulence atmosféry není uvažován)

konstantním zrychlením. Zároveň zvolí charakteristiky náhodného kmitání báze DP (u vozidla odpérovaných částí) pro šest stupňů volnosti (rozměry, parametry výkonové spektrální hustoty, vlastní frekvence a poměrné útlumy).

Během vlastního výpočtu jsou především určeny v každém okamžiku hodnoty úhlu náměru  $\varphi_{ZB}$  a odměru  $\psi_{ZB}$ , které zaručují přesné zamíření pelengačních os SS POED do tzv. záměrného bodu, který je zvolen pevně na cíli. Jedná se tedy o řídící veličiny pro kanál směru (obr. 1). Dále jsou vypočítávány úplné náhodné kmity báze DP (šest stupňů volnosti – složení pohybu DP jako hmotného bodu a vlastních náhodných kmitů báze) na které je umístěn Cardanův závěs s částmi SS POED, které představují pro kanál směru poruchy (kinematické buzení – obr. 1 a 3). Mimo to, jsou počítány i další parametry, které však nemají význam pro činnost SKS. Popis základních algoritmů se kterými programy EFG a SNBP pracují je uveden v [1, 2].



Obr. 3 Princip řízení řízeného objektu



Obr. 4 Struktura modelu samosvorné převodovky [4]

Model kanálu směru SS POED (vlastní SW simulátoru) se skládá z následujících dílčích modelů (obr. 1):

- modelu turbulentní atmosféry,
- modelu řízeného objektu,
- modelu imitátoru zaměřovače a
- modelu technické části regulátoru.

Turbulentní atmosféra představuje náhodný přenosový kanál pro optický signál. V důsledku turbulentních fluktuací atmosféry dochází k náhodnému kmitavému pohybu obrazu záměrného bodu v zaměřovači okolo jeho správné polohy. Použitý model je poměrně jednoduchý a je popsán v [1]. Dokonalejší model, který bude následně do dalších verzí programu implementován, je popsán ve studii [3].

Vlastní systém zamiřování (kanál směru) lze charakterizovat (Obr.1) jako nepřímý regulátor resp. nelineární neautonomní dvourozměrný polohový servomechanismus resp. nelineární neautonomní systém řízení v uzavřeném obvodu (regulace) se dvěma regulovanými veličinami a to (relativním) náměrem  $\varphi$  a (relativním) odměrem  $\psi$  pelengačních os SS POED (vůči bázi dopravního prostředku). Na obrázcích 1, 5 až 8 je, pro jednoduchost, znázorněna vždy pouze jedna regulační smyčka, neboť obě tyto smyčky (náměru a odměru) jsou prakticky shodné.



Obr. 5 Schéma regulační smyčky v režimu bez měření poruch (režim A) – "režim zamiřování (navádění, sledování)"



Obr. 6 Příklad struktury jádra rychlostního systému

6



Obr. 7 Schéma regulační smyčky v režimu s měřením poruch (režim B) – "režim stabilizace"



Obr. 8 Příklad struktury prvků systému stabilizace

Systém pracuje obvykle ve dvou základních režimech – ručního resp. motorického pohonu. Režim motorického pohonu má dva dílčí režimy – režim bez měření poruch ("A" – Obr. 1, 5) tzv. *režim zamiřování (navádění, sledování)* a režim s měřením poruch ("B" – obr. 1, 7, 8) tzv. *režim stabilizace* ("zorného pole zaměřovače "resp. pelengačních os SS POED).

Neautonomnost je do systému vnášena rozměrovými a tudíž i hmotnostními nesymetriemi SS POED se zaměřovačem a Cardanova závěsu. To se pak projevuje tím, že příslušné tenzory setrvačnosti popisující chování této zátěže vzhledem ke změnám náměru resp. odměru mají nenulové nediagonální prvky [6].

Nelinearity jsou do systému vnášeny minimálně vlastnostmi operátora a převodovek [4], dále tím, že prvky tenzorů setrvačnosti jsou nelineárními funkcemi úhlu náměru  $\varphi$  a odměru  $\psi$  [6] a konečně také tím, že jsou uplatněny principy časově optimálního řízení [1, 5].

Model řízeného objektu – Cardanův závěs s částmi SS POED (obr. 1, 3) je popsán v [6]. Chování řízeného objektu vzhledem k druhým derivacím úhlu náměru  $\varphi$  a odměru  $\psi$  je dáno soustavou dvou nelineárních diferenciálních rovnic druhého řádu s časově proměnnými funkcemi a koeficienty v implicitním tvaru (pohybové rovnice hřídelí vnějšího a vnitřního rámu Cardanova závěsu).

S modelem řízeného objektu úzce souvisí i model samosvorné převodovky, která je vložena mezi příslušnou hřídel Cardanova závěsu a hřídel – rotor odpovídajícího elektromotoru (obr. 5, 6, 7, 8), případně i hydromotoru. V systémech zamiřování je totiž dávána přednost samosvorným převodovkám. Model samosvorné převodovky je popsán v příspěvku [4]. Základ modelu tvoří tři pohybové rovnice (obr. 4) a to pro hřídel elektromotoru, hřídel Cardanova závěsu, která je totožná s odpovídající nelineární diferenciální rovnicí v implicitním tvaru (viz výše) a výstupní hřídel samosvorné dvojice. S využitím modelu lze simulovat vliv vůlí v převodech spolu s jejich konečnou tuhostí, vliv zařízení pro vymezování vůlí a vliv pojistných spojek (třecích i zubových) a jejich seřízení. Po jednoduché úpravě parametrů lze simulovat vlastnosti nesamosvorné převodovky.

Model imitátoru zaměřovače (obr. 1, 5, 7) slouží k výpočtu regulačních odchylek a jejich zobrazení na LCD displeji imitátoru. Regulační odchylky spolu s dalšími zvolenými údaji jsou průběžně ukládány do paměti ve formátu \*.txt a slouží, spolu s údaji generovanými programy EFG resp. SNBP, pro další zpracování dat, jehož cílem je zpřesňování modelů chování operátora resp. zdokonalování technické části kanálu směru SS POED ve výše objasněném smyslu.

Poloha záměrné (zaměřovací) značky (obr. 2) vůči středu zorného pole (optické ose) optického zaměřovače nebo "středu" displeje (obrazovky) optoelektronického zaměřovače může mít "funkčně" stabilní a nebo řiditelnou polohu. Má-li záměrná značka "funkčně" stabilní polohu, pak tato poloha se sice může v procesu zamiřování měnit, avšak pouze na základě informací o vzájemném pohybu DP a cíle (v SKS nebude využíváno). Jde například o plynulé nastavování proměnné hodnoty záměrného úhlu a nadběhu. V tomto případě se hovoří o "*kompenzačním sledování (zamiřování)*" cíle [1], kdy ovládací povely vydávané operátorem se projevují pouze jako jím řízený pohyb záměrné značky a tudíž i středu zorného pole (displeje) vůči okamžité poloze záměrného bodu a tedy i cíle.

V případě kompenzačního sledování operátor má dobře zobrazenou pouze regulační odchylku tj. rozdíl v poloze záměrného bodu a záměrné značky. Z hlediska strukturního schématu se jedná o analogii obyčejného *sledného systému*, pro nějž řídícím signálem je pouze rozdíl mezi vstupní a výstupní veličinou tj. regulační odchylka (záměrná značka – záměrný bod). Kompenzační sledování se užívá u drtivé většiny reálných zaměřovačů, proto je uplatněno i v SKS.

Ve skutečnosti na displeji (obr. 2) není zobrazován pouze záměrný bod, ale obdélník v jehož středu záměrný bod leží. Okamžitá velikost obdélníku závisí na zvolených rozměrech cíle (2A x 2B), okamžité šikmé dálce cíle D<sub>0</sub> (počítá program EFG resp. SNBP) [1, 2] a zvolené hodnotě příčného zvětšení simulovaného zaměřovače  $\Gamma$  [1]. Lze volit mezi dvěma předem zadanými hodnotami zvětšení. Předem lze také nastavit kontrast jasu a barvy obdélníku vůči jeho homogennímu pozadí. V budoucnu bude zobrazována celá virtuální scéna včetně dokonalejšího zahrnutí atmosférické turbulence a útlumu.

Jestliže doposud popsané subsystémy softwaru budou i v budoucnu relativně stabilní, pak model technické části regulátoru (obr. 1) je považován za stavebnici, která bude neustále zdokonalována a doplňována tak, aby bylo možno simulovat co nejvíce se v praxi vyskytujících systémů kanálu směru SS POED. V následující části uvedeme informace o současné – základní variantě modelu technické části regulátoru [1, 5].

Model pohonu (obr. 6) je tvořen obvyklým modelem stejnosměrného elektromotoru s cizím buzením a stálým polem [1]. Model řiditelného výkonového zesilovače je představován modelem řiditelného impulsního měniče se dvěma impulsními spínači, který napájí obvod kotvy elektromotoru a realizuje šířkovou modulaci (řízení střídy) [1].

Kvalita regulace je zabezpečována zavedením zpětných vazeb (obr. 5 až 8) - proudové a rychlostní spolu s použitím regulátorů proudu a napětí. Regulátor proudu je nelineární a adaptivní regulátor s kompenzací vlivu přerušovaných proudů [11]. Ve stavu přerušení proudu se chová jako I - regulátor, kdežto ve stavu nepřerušeného proudu lze volit varianty – dvojnásobný PI – regulátor resp. jednonásobný, případně pouze P- regulátor.

Regulátor rychlosti představuje PI – regulátor, případně P – regulátor. Omezovače proudu a rychlosti [1, 11, 12] zabezpečují ochranu elektromotoru před jeho přetížením a zároveň hrají významnou roli v rámci opatření k dosažení časově optimálního řízení.

Časově optimální řízení umožňují dva tvarovače [1], jejichž činnost je odvozena od velikosti vychýlení ovladače  $e_{OV}$  uskutečňovaného operátorem. První tvarovač pracuje v režimu A i B, kdežto druhý tvarovač, generující funkci g( $e_{OV}$ ) (Obr. 5), pracuje pouze v režimu A. Oba tvarovače jsou nelineární (viz dále).

Druhý tvarovač vytváří proměnnou hodnotu napětí předávanou rychlostní zpětnou vazbou  $u_{ZVR} = u_R(\omega) \cdot g(e_{OV})$ , kde  $u_R(\omega)$  je napětí generované převodníkem úhlové rychlosti motoru.

V režimu B (obr. 7) je signál rychlostní zpětné vazby odpojen a je nahrazen signálem generovaným gyroskopickým snímačem (absolutní) úhlové rychlosti vnitřního rámečku (Obr. 8). Řídící signál v tomto režimu je získáván prostřednictvím řízeného gyroskopického snímače úhlové odchylky (gyroskop se třemi stupni volnosti a příslušenstvím – obr. 8) [1].

Zvláštní postavení má signál generovaný snímačem lineárního zrychlení [1]. Umožňuje přibližnou realizaci principu částečné invariance regulační odchylky na (proti) poruše představované právě lineárním zrychlením působícím v příslušném těžišti zátěže (náměr, odměr), a které se nenachází přesně na odpovídající ose otáčení.

### 4. Časově optimální řízení

. .

Regulátory polohy, mezi něž kanál dálky náleží, jsou obvykle navrhovány jako časově optimální (t-optimální) u nichž regulační pochod proběhne nejrychleji při respektování a plném využití omezení [1, 11, 12]

$$|\omega| \le \omega_{\rm M},\tag{1}$$

$$|I_a| \le I_{max}$$
 resp.  $|M| \le M_{max}$  resp.  $|\dot{\omega} \le \varepsilon_{max}|$  (2)

\_\_\_\_\_ Engineering Mechanics, Svratka 2006, #170 \_

Uvedená omezení realizuje omezovač (úhlové) rychlosti a omezovač proudu kotvy Ia.

Z hlediska toho, zda je dosahováno omezujících hodnot ( $\omega_M$ ,  $\varepsilon_{max}$  resp.  $I_{max}$ ) je vhodné rozlišovat tři druhy režimů práce regulátoru polohy a to režim

- malých (úhlových) přemístění (regulačních odchylek polohy e<sub>OV</sub> obr. 5 až 8),
- středních (úhlových) přemístění a
- velkých (úhlových) přemístění.

Při malých přemístěních je  $\omega$  a  $\varepsilon$  resp. M, I<sub>a</sub> tak malé, že nedochází vůbec k jejich omezování. Při středních přemístěních je dosaženo maximálního zrychlení  $|\varepsilon| = \varepsilon_{max}$  resp. momentu  $|M| = M_{max}$  resp. proudu  $|I_a| = I_{max}$ , avšak i zde úhlová rychlost nedosahuje svého dovoleného maxima  $\omega_M$ . Při velkých přemístěních je určující dosažení maxima úhlové rychlosti  $|\omega| = \omega_M$ . Z výše uvedeného vyplývá, že obvyklé úvahy týkající se zamiřování resp. sledování cíle se vztahují k malým (úhlovým) přemístěním [1].

Běžné typy ovladačů (joysticků) realizují lineární závislost mezi výchylkou - lineární nebo úhlovou (izotonický ovladač) resp. působící silou/momentem (izometrický ovladač) e<sub>OV</sub> a výstupním napětím

$$u_v = K_{OV} \cdot e_{OV} = u_{vm} \cdot \xi, \qquad \xi = e_{OV} / e_{OVm}$$
(3)

kde  $K_{OV}$  je zesílení ovladače,  $e_{OVm}$  je maximální výchylka resp. síla/moment ovladače a

 $u_{vm}$  je odpovídající maximální hodnota výstupního napětí.

Jsou-li uplatněny principy časově optimálního řízení, pak je za ovladač přidán ještě tvarovač, který realizuje nelineární transformaci pro napětí  $u_T = T(u_v)$  resp. transformaci

$$u_{T} = T_{0}(e_{OV}) = \begin{bmatrix} 0 & |e_{OV}|\langle e_{OV1} \\ F(|e_{OV}|) \cdot sign(e_{OV}) & |e_{OV}| \in \langle e_{OV1}, e_{OV2} \rangle \\ u_{Tm} \cdot sign(e_{OV}) & |e_{OV}| \in (e_{OV2}, e_{OVm} \rangle \end{bmatrix},$$
(4)

kde  $u_{Tm}$  je maximální hodnota výstupního napětí tvarovače  $u_T$ , která plní stejnou funkci jako omezovač rychlosti. Ten není nutno v tomto případě užívat.  $e_{OV1}$ ,  $e_{OV2}$  jsou zadané hodnoty [1], přičemž hodnotou  $e_{OV1} \in \langle 0, e_{OV2} \rangle$  je dáno pásmo necitlivosti,  $e_{OV2} \in (e_{OV1}, e_{OVm})$ . Funkce  $F(|e_{OV}|) > 0$  je spojitá a monotónně rostoucí argumentu  $|e_{OV}|$ , přičemž platí  $F(|e_{OV1}|) = u_{T1}$ ,  $F(|e_{OV2}|) = u_{T2}$ , první derivace v bodě  $|e_{OV1}|$  zprava je  $K_{T1} > 0$  a první derivace v bodě  $|e_{OV2}|$  zleva je  $K_{T2}$  ( $K_{T1} \le K_{T2}$ ).

Pro funkci  $F(|e_{OV}|) > 0$  lze použít například následující aproximaci

$$|u_{\rm T}| = F(|e_{\rm OV}|) \approx u_{\rm T1} + a \cdot (|e_{\rm OV}| - e_{\rm OV1}) + b \cdot (|e_{\rm OV}| - e_{\rm OV1})^{\beta},$$
 (5)

kde a, b,  $\beta$  jsou aproximační konstanty pro něž vzhledem k okrajovým podmínkám platí

$$\begin{aligned} a &= K_{T1}, \qquad \beta = (e_{OV2} - e_{OV1}) \cdot (P_2/P_1), \qquad b = P_1 \cdot (e_{OV2} - e_{OV1})^{-\beta} \\ P_1 &= (u_{T2} - u_{T1}) - (e_{OV2} - e_{OV1}) \cdot K_{T1}, \qquad P_2 = K_{T2} - K_{T1}. \end{aligned}$$

Ústředním pojmem časově optimálního řízení polohy je tzv. "nulová trajektorie" [1, 12] ve fázovém prostoru (q,  $\dot{q}$ , $\ddot{q}$ ). Nulovou trajektorii lze také charakterizovat jako závislost, která udává, jakou rychlostní odchylku  $\Delta \dot{q}$  by soustava měla mít při právě se vyskytující polohové odchylce  $\Delta q$ , aby regulační pochod byl optimální. Splnění tohoto požadavku obstarává regulátor rychlosti jako celek.

Z teorie regulace je známo, že odezvy blízké optimální lze dosáhnout tak, že se po vzniku regulační odchylky polohy  $\Delta q$  pohon má rozbíhat nejdříve bez tlumení tj. s odpojenou rychlostní zpětnou vazbou (g(e<sub>ov</sub>)  $\cong$  0) a teprve po určité době je nutno tuto vazbu připojit

10 \_

 $(g(e_{OV}) \neq 0)$ , čímž dojde k vlastnímu tlumenému přechodovému ději [1, 12]. K přepnutí dojde na tzv. přepínací křivce ve fázovém prostoru. Přepínací křivka je obvykle aproximována pouze přímkou procházející počátkem souřadnic [12].

V systémech zamiřování zbraní [1] je výše uvedený problém řešen následovně: Ovladač ovládá nejen jednotku tvarovače generující transformaci danou vztahem (4), ale ještě další synchronní transformaci  $u_{ZVR} = u_R(\omega) \cdot g(e_{OV})$ . To ovšem zároveň znamená, že existuje i jednoznačná závislost  $g(e_{OV}(u_T)) = g(u_T)$  o kterou právě jde a která je ovladačem ( $e_{OV}$ ) pouze zprostředkovávaná.

Funkce  $g(e_{OV}(u_T)) = g(u_T)$  má být z hlediska teorie optimálního řízení monotónně klesající, neboť malé hodnoty  $u_T$  a tudíž i  $e_{OV}$  odpovídají řízení v režimu malých přemístění v němž má být hodnota  $g(u_T)$  blízká jmenovité  $g(u_T) = 1$ , aby proces navádění byl dobře tlumený, kdežto oblast velkých hodnot  $u_T$  a  $e_{OV}$  odpovídá režimu velkých přemístění (přenos zamíření na nový cíl maximální rychlostí), kdy je potřeba, aby hodnota  $g(u_T)$  se blížila své minimální hodnotě  $g_m \in \langle 0, 1 \rangle$ . Její velikost plyne z požadavku zabezpečení přiměřené stability regulované soustavy v tomto režimu. Mezilehlé hodnoty  $u_T$  a  $e_{0V}$  odpovídají režimu středních přemístění, který je typický pro počátek procesu zamiřování na daný cíl po ukončení vlastního přenosu zamíření [1].

Váhovou funkci  $g(e_{OV}(u_T)) = g(u_T) \ge 0$  lze aproximovat například vztahem [1]

$$g(e_{OV}) = \begin{vmatrix} 1 & |e_{OV}| \le e_{OV3} \\ G(|e_{OV}|) & |e_{OV}| \in \langle e_{OV3}, e_{OV4} \rangle \\ g_m & |e_{OV}| \in (e_{OV4}, e_{OVm} \rangle \end{vmatrix},$$
(6)

kde funkce  $G(|e_{OV}|) \ge 0$  je funkce monotónně klesající a platí

 $e_{OV3} \in (0, e_{OV4}), e_{OV4} \in (e_{OV3}, e_{OVm}), G(|e_{OV3}|) = 1, G(|e_{OV4}|) = g_4 \le 1, g_4 \ge g_m.$ 

Pro hodnotu  $g(e_{OV}) = 1$  by mělo být dosaženo bezpečnosti ve fázi (phase margin) alespoň 30 až 40%, kdežto pro  $g(e_{OV}) = g_m$  pravděpodobně cca 5 až 10% [1].

Jedním z důležitých úkolů bude identifikace nejvhodnějších parametrů v transformacích (4) a (6) a to pro různá provedení technické části kanálu směru SS POED.

#### 5. Závěr

V příspěvku jsme informovali o účelu a základní struktuře simulátoru kanálu směru SS POED. V následujících publikacích se soustředíme na prezentování výsledků měření realizovaných s využitím tohoto zařízení.

#### 6. Poděkování

Tato práce vznikla za podpory z finančních prostředků Výzkumného záměru Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany číslo FVT0000402: "Výzkum pasivních optoelektronických systémů automatického sledování cíle pro systémy řízení palby".

#### 7. Literatura

[1] Čech,V.: Soubor matematických modelů pro hodnocení vlivu přesnosti měření vzdálenosti cílů pasivním optoelektronickým dálkoměrem na užitné vlastnosti typických

palebných systémů pozemních sil (Výzkumná zpráva). Součást projektu průmyslového výzkumu MPO ČR – kód projektu: FD – K3/099. Brno 2003, s. 224

- [2] Čech,V. Jevický, J.: The Problem of the Exitation Functions Generation for the Model for the Special Positional Servomechanism of the Rangefinder. In: Book of Extended Abstracts of Engineering Mechanics 2004 and Proceedings on CD-ROM, Svratka, 10. až 13. 5. 2004, s. 61 až 62, ISBN 80-85918-88-9
- [3] Čech,V.: Model vlivu turbulence přízemní vrstvy atmosféry na kvalitu optického zobrazení (Vědecko-výzkumná studie). Součást projektu průmyslového výzkumu MPO ČR, kód projektu: FD-K3/99, Název projektu: Výzkum a vývoj technologie a technických prostředků pro pasivní optoelektronické sledování a měření objektů. Brno 2004, s. 99
- [4] Čech,V.- Jevický,J.: Zjednodušený dynamický model samosvorné převodovky. In.: Proceedings of Colloquium Dynamics of Machines 2005, Praha, 8. a 9. 2. 2005, s.15 až 22, ISBN – 80-85918- 79 – X
- [5] Čech,V.- Jevický,J.: Soubor programů pro simulaci činnosti systému prolongace dráhy cíle. In: Proceedings of 39th International Conference Modeling and Simulation of Systems MOSIS 05, Hradec nad Moravicí, 19. až 21. 4. 2005, s. 266 až 273, ISBN 80-86840-10-7
- [6] Čech, V.- Jevický, J.: The Stochastics Excitation Model of the Controlled System the Rangefinder Mounted in the Gimbals Suspension on the Vehicle. In: Book of Extended Abstracts of Engineering Mechanics 2005 and Proceedings on CD-ROM, Svratka, 9. až 12. 5. 2005, s. 73 až 74, ISBN 80-85918-93-5
- [7] Čech, V. Jevický, J. Suchomel, P.: Dynamické vlastnosti experimentálního stendu pro simulování účinků náhodného kinematického buzení na technická zařízení a člověka. In.: Proceedings of Colloquium Dynamics of Machines 2006, Praha, 7. a 8. 2. 2005, s. 5 až 12, ISBN 80 85918 97 8
- [8] Juliš, K. Brepta, R. aj.: Mechanika, II.díl Dynamika. Technický průvodce 66, Praha, SNTL 1987, s. 688
- [9] Levin, B.R.: Teorie náhodných procesů a její aplikace v radiotechnice. Praha, SNTL 1965, s. 570
- [10] Balda, M. Hanuš, B. aj.: Základy technické kybernetiky. Praha, SNTL/ALFA 1986, s. 348
- [11] Kalaš, V. Jurišica, L. Žalman, M.: Technická kybernetika elektrických pohonov, Bratislava, Alfa 1978, s. 390
- [12] Čadil, F. aj.: Elektrické pohony. Praha, SNTL/ALFA 1976, s. 560
- [13] Kubík,S. Kotek, Z. Strejc, V. Štecha, J.: Teorie automatického řízení I. Praha, SNTL – TKI 1982, s. 528
- [14] Kubík, S. Kotek, Z. Razím, M. Hrušák, J. Branžovský, J.: Teorie automatického řízení II. Praha, SNTL TKI 1982, s. 304

Poznámka: Základní přehled použité literatury je uveden v [1] (133 položek).

12