



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DĚKANÁT FAKULTY ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ANALÝZA MODELŮ CHOVÁNÍ PILOTA PŘI ŘÍZENÍ LETU LETOUNU

ANALYSIS OF PILOT'S BEHAVIOUR MODELS DURING FLIGHT

DIZERTAČNÍ PRÁCE – ZKRÁCENÁ VERZE

DOCTORAL THESIS – SHORTENED VERSION

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Miroslav Jirgl

ŠKOLITEL
SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.

BRNO 2016

OBSAH

1	ÚVOD	3
1.1	Cíle dizertační práce.....	3
2	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	4
2.1	Systémy MMS.....	4
2.2	Dynamické modely chování pilota	5
2.2.1	„Precision“ model a jeho varianty.....	5
2.2.2	Další typy dynamických modelů chování člověka.....	6
2.3	Dynamický model podélného letu letounu	7
3	MMS SYSTÉM PILOT-LETOUN	8
3.1	Použité metody.....	8
3.1.1	Měření na leteckém simulátoru.....	8
3.1.2	Identifikace.....	9
3.2	Identifikace parametrů regulované soustavy.....	9
3.3	Identifikace parametrů regulátoru.....	10
3.4	Popis MMS systému pomocí regulační smyčky	12
4	HODNOCENÍ AKTUÁLNÍHO STAVU PILOTŮ NA ZÁKLADĚ MĚŘENÍ JEJICH REAKCÍ	15
4.1	První sada měření – červen 2015	15
4.1.1	Hodnocení využitím integrálních kritérií kvality	15
4.1.2	Hodnocení na základě modelování lidského chování	16
4.1.3	Hodnocení schopností pilotů na základě polohy frekvence řezu	20
4.2	Druhá sada měření – prosinec 2015	21
4.2.1	Hodnocení využitím integrálních kritérií kvality	21
4.2.2	Hodnocení na základě modelování lidského chování	22
4.2.3	Hodnocení schopnosti pilotů na základě polohy frekvence řezu	23
5	HODNOCENÍ MÍRY VÝCVIKU PILOTŮ	24
	ZÁVĚR	26
	LITERATURA.....	28

1 ÚVOD

V současné době je člověk obklopen nejrůznějšími technickými zařízeními. U většiny těchto zařízení dochází k různě složité interakci s člověkem. Jednou z nejsložitějších interakcí mezi člověkem a strojem je řízení letounu. Tato činnost je velmi kritická, neboť sebemenší selhání či pochybení může způsobit katastrofické následky. Některé studie, např. analýza leteckých nehod v komerční sféře provedená před několika lety institutem Federal Aviation Administration v USA, dokonce potvrzují, že člověk je svými zásahy zodpovědný za téměř 68% leteckých nehod. [1]

Člověk-pilot z pohledu kybernetiky plní při řízení letounu funkci lidského regulátoru. Tento regulátor je velmi univerzální a efektivní neboť dokáže rychle řešit neočekávané a nepředvídatelné situace a dokáže se přizpůsobit (adaptovat) změnám podmínek, avšak na rozdíl od automatického regulátoru podléhá různým vlivům, jako jsou stres, únava, apod., které mohou jeho schopnosti degradovat. Schopnost adaptace na řízenou dynamiku a zároveň na změny podmínek je do jisté míry dána zejména kvalitou výcviku pilota a jeho zkušenostmi. Právě výcvik a zkušenosti jsou pak často rozhodujícím faktorem ovlivňujícím lidské chování v dané situaci.

Existuje řada modelů popisujících lidské chování. Tyto modely jsou často rozděleny na několik úrovní - kognitivní, koordinační, regulační, apod. [2]. Na nejnižší úrovni - regulační člověk využívá naučené automatické řídicí činnosti. Z toho vyplývá, že právě tato úroveň je pak nejvíce ovlivněna výcvikem, neboť odráží pilotovy dovednosti a schopnosti reagovat daným způsobem na změny situace. Na druhou stranu je to však úroveň, která relativně snadno podléhá výše uvedeným negativním vlivům. Na základě řady experimentů a nejrůznějších typů modelování lidského chování bylo ověřeno, že na této regulační úrovni lze lidské chování s dostatečnou přesností popsat pomocí matematických modelů využívaných v teorii dynamických systémů. Na základě těchto modelů lze pak vyhodnotit určité parametry lidského chování, jako je reakční doba, kvalita řízení dané dynamiky, apod.

1.1 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Dizertační práce je obecně zaměřena na výzkum v oblasti analýzy dostupných modelů chování pilota při řízení letu letounu z pohledu systémů automatického řízení a jejich využití pro objektivní posouzení aktuálního stavu a míry výcviku pilota. Cíle této práce lze pak shrnout pomocí následujících bodů.

1. Studium problematiky popisu MMS systému pilot-letoun a jeho modelování.
2. Vytvoření simulačního modelu (simulačních modelů) pilot-letoun, na základě dat získaných reálnými měřeními, pro účely získání poznatků o dynamickém chování tohoto MMS systému.
3. Prohloubení poznatků o možnostech modelování lidského chování (chování pilota).
4. Návrh a realizace sady experimentálních měření s reálnými piloty s využitím leteckého simulátoru za účelem získání poznatků o jejich aktuálním stavu, z pohledu dynamického chování, a způsobech a přístupech k řízení.
5. Návrh metodiky pro hodnocení aktuálního stavu a míry výcviku pilotů na základě experimentálně získaných dat.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Jak již bylo nastíněno v úvodu, obecně se tato práce věnuje problematice popisu interakce systému člověk-stroj, označované také jako MMS systém. Konkrétně se zde jedná o řízení letu letounu pilotem. V takovém případě je pro popis tohoto systému třeba popsat jednotlivé prvky, tzn. pilota i řízený element, tj. letoun.

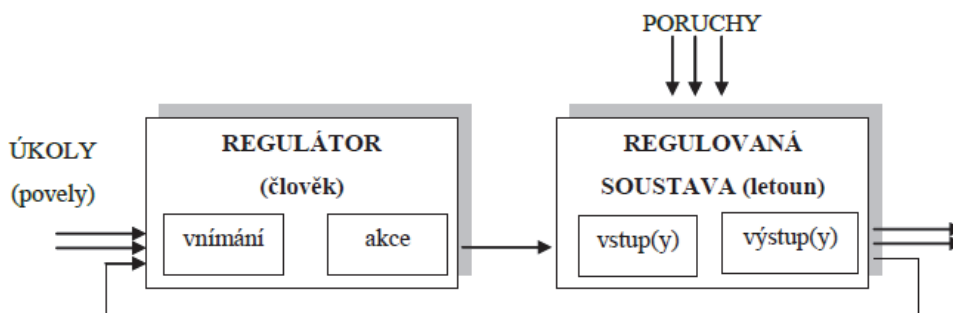
Schopnost pilota řídit letoun je záležitostí intenzivního výcviku, zejména pokud se jedná o profesionální piloty, ať už vojenské či civilní. V tomto případě musí piloti pravidelně absolvovat různé testy způsobilosti, lékařské prohlídky i různá školení. Pravidelně jsou také testováni, resp. cvičeni, za pomoci certifikovaných leteckých simulátorů, které nabízí např. firma Let'sFly s.r.o. v Mošnově.

Letecké simulátory zaznamenaly v posledních letech poměrně velký rozmach, což je způsobeno zejména dostupností moderních technických i výpočetních technologií. Existují nejrozličnější druhy těchto simulátorů – stacionární, pohyblivé založené na různých platformách, simulátory využívající nejrozličnější softwarové vybavení, apod.

Ačkoli, jak již bylo zmíněno, piloti pravidelně absolvují nejrozličnější formy výcviku, který zahrnuje také výcvik za pomoci leteckých simulátorů, problematika hodnocení stavu pilotů, resp. určitá kvantifikace míry výcviku, je velmi problematická. V současnosti se toto hodnocení provádí např. na základě kamerového sledování. To spočívá ve využití leteckého simulátoru, kde jsou piloti neustále pod dohledem kamerového systému. Tyto kamerové záznamy jsou poté vyhodnocovány zejména z pohledu dodržení správnosti postupů a vykonávaných rutin. Vyjma základních testů způsobilosti, apod. zde tak chybí metodika či postup, jak ohodnotit nebo popsat daného pilota z pohledu jeho dovedností či schopností řídit daný letoun.

2.1 SYSTÉMY MMS

V současné době je člověk obklopen nejrozličnějšími technickými zařízeními. U těchto zařízení pak dochází k různě složité interakci s člověkem. Interakce člověka s řízeným systémem bývá často souhrnně označována jako MMS (*Man-Machine System*) [3]. Jednou z nejsložitějších interakcí mezi člověkem a strojem je řízení letounu, neboť schopnost člověka, potažmo pilota, řídit letoun předpokládá zpracovávání velmi různorodých informací a jejich převedení do odpovídajících pohybů řídicích orgánů na letounu. Z pohledu kybernetiky je možné takový MMS systém popsat jako regulační smyčku, viz Obrázek 1, kde člověk (pilot) plní funkci lidského regulátoru [4].



Obrázek 1: MMS systém pilot-letoun jako regulační smyčka

Většina MMS systémů je poměrně komplexní. Člověk musí sledovat a řídit hned několik veličin, které mají vliv na výsledek řízeného procesu. Takové systémy se nazývají MIMO systémy (*Multi-Input Multi-Output*). Popis i analýza takových systémů je velmi obtížná, neboť ve většině případů dochází ke vzájemné interakci mezi jednotlivými vstupními a výstupními, resp. stavovými, veličinami. Z tohoto důvodu je tedy vhodné celý systém popsat nejlépe jako SISO systém (*Single-Input Single-Output*). Aby bylo toto zjednodušení možné, je třeba jednoznačně vymezit požadovaný úkol a minimalizovat tak počet řízených/řídících veličin.

2.2 DYNAMICKÉ MODELÝ CHOVÁNÍ PILOTA

Popisem člověka jako regulátoru se začal zabývat prof. J. Rasmussen, který vytvořil základní model pro popis řídicích činností člověka [5]. Tento model sestává ze tří úrovní, a sice:

- **regulační úroveň** – přímé, zpětnovazební (kompenzační) řízení,
- **koordinační úroveň** – řízení na základě pravidel,
- **organizační úroveň** – řízení na základě znalostí.

Na základě tohoto obecného modelu pak vznikaly další (konkrétnější) modely popisující zejména dynamické vlastnosti lidského chování. K nejvýznamnějším představitelům v této oblasti patří prof. Duan T. McRuer. Vycházel z předpokladu, že po přijmutí určitých zjednodušení, lze popsat chování člověka jako kompenzačního regulátoru pomocí teorie lineárních dynamických systémů a předložil teorii nazývanou **Crossover law** (volně přeloženo jako "Zákon frekvence řezu"). Výsledkem této teorie je, že člověk přizpůsobuje svůj akční zásah dynamice regulované soustavy (adaptuje se) tak, aby platila následující rovnice pro frekvenční přenos otevřené regulační smyčky $F_0(j\omega)$ [6].

$$F_0(j\omega) = F_R(j\omega) \cdot F_S(j\omega) = \frac{\omega_c}{j\omega} \cdot \exp(-j\omega\tau), \quad (1)$$

kde $F_R(j\omega)$ - frekvenční přenos regulátoru (člověka, resp. pilota), $F_S(j\omega)$ - frekvenční přenos regulované soustavy, ω - frekvence [rad.s^{-1}], j - imaginární jednotka, ω_c - frekvence řezu [rad.s^{-1}], τ - dopravní (reakční) zpoždění [s].

2.2.1 „Precision“ model a jeho varianty

Na základě teorie *Crossover law* a realizace mnoha měření později McRuer vytvořil tzv. „**Precision**“ model ve tvaru rovnice (2). Tento model popisuje obecné chování lidského regulátoru v širším rozsahu frekvencí pro různé dynamiky s ohledem na požadavky podle rovnice (1). Adaptace člověka na různé typy dynamiky je realizována nastavováním konstant T_L , T_I a K_R . Poměr konstant T_L a T_I pak určuje charakter přenosové funkce, tzn. derivační („*lead-lag*“) či integrační („*lag-lead*“). Součástí modelu je i modul popisující dynamiku neuromuskulárního, resp. neuromotorického, systému člověka (pilota), jehož matematický popis vychází z fyziologického a neurologického popisu člověka a jeho odvození lze nalézt v literatuře [8–10].

Ačkoli je tento model poměrně podrobný, častěji se lze v literatuře setkat s jednoduššími formami, které z tohoto modelu přímo vycházejí [11], [12–15]. Jednou z variant je hrubá aproximace dynamiky neuromuskulárního systému pomocí čistého dopravního zpoždění τ_N , které

lze přičíst k celkovému dopravnímu (reakčnímu) zpoždění lidského regulátoru τ . Výsledná přenosová funkce je pak ve tvaru (3) a bývá označována jako „hrubý“ resp. „**Gross**“ model [16].

V současnosti nejpoužívanějším modelem lidského chování je však model ve tvaru rovnice (4), který bývá v literatuře často označován také jako **Tustin-McRuerův model** [17]. Jedná se o model aproximující neuromuskulární systém pomocí setrvačného členu 1. řádu s jednou časovou konstantou T_N , označovanou souhrnně jako neuromuskulární časová konstanta.

Výsledné McRuerovy modely v operátorovém tvaru jsou tedy následující:

- Precision model:

$$F_R(p) = K_R \cdot \frac{(T_L p + 1)}{(T_I p + 1)} \cdot \exp(-p\tau) \cdot \left(\frac{\text{neuromuskulární systém}}{\left[\left(\frac{p}{\omega_N} \right)^2 + \frac{2\xi_N}{\omega_N} p + 1 \right]} \right), \quad (2)$$

- Gross model:

$$F_R(p) = K_R \cdot \frac{(T_L p + 1)}{(T_I p + 1)} \cdot \exp[-p(\tau + \tau_N)], \quad (3)$$

- Tustin-McRuerův model:

$$F_R(p) = K_R \cdot \frac{(T_L p + 1)}{(T_N p + 1)(T_I p + 1)} \cdot \exp(-p\tau), \quad (4)$$

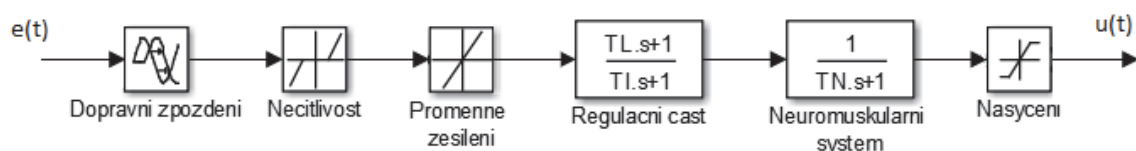
kde K_R - zesílení (zisk) [-], T_L - derivační (prediktivní) časová konstanta (*lead time constant*) [s], T_I - integrační (setrvačná) časová konstanta (*lag time constant*) [s], T_N - neuromuskulární časová konstanta [s], ω_N - vlastní frekvence kmitů neuromuskulárního systému [rad.s^{-1}], ξ_N - tlumení neuromuskulárního systému [-], τ - dopravní (reakční) zpoždění [s], τ_N - dopravní zpoždění aproximující dynamiku neuromuskulárního systému [s], p - Laplaceův operátor.

Tustin-McRuerův model ve tvaru rovnice (4) se stal výchozím pro řadu experimentů. Populárním se stal zejména díky možnosti fyziologické a neurologické interpretace jednotlivých parametrů. V literatuře lze také nalézt experimentálně zjištěné intervaly, ve kterých se hodnoty jednotlivých parametrů nejčastěji pohybují.

2.2.2 Další typy dynamických modelů chování člověka

V literatuře je možné nalézt také další typy modelů popisujících dynamické chování člověka, ať už jako pilota či řidiče, viz [13], [15], [18]. Většina těchto modelů přímo vychází z lineárních McRuerových modelů. Příkladem může být **model řidiče podle R. A. Hesse** [19].

Další z možností je rozšíření Tustin-McRuerova modelu o základní nelinearity, zejména pak nasycení, proměnné zesílení či necitlivost, viz Obrázek 2 [20].



Obrázek 2: McRuerův model chování člověka se zavedením základních nelinearit

Existují samozřejmě i další typy modelů popisující lidský regulátor, které přímo nevycházejí z McRuerovy teorie. Příkladem jsou modely založené na využití **optimálního stavového regulátoru** – **OCM** (*Optimal Control Model*), viz např. [17], či modely využívající **umělou inteligenci** (neuronové sítě, fuzzy logiku, apod.). Příklady takových modelů lze opět nalézt např. v [21], [22]. Tyto modely však na rozdíl od McRuerových modelů buď postrádají možnost fyziologické či neurologické interpretace nebo jsou to metody či modely relativně složité. Jejich identifikace a následná analýza je pak poměrně obtížná.

2.3 DYNAMICKÝ MODEL PODÉLNÉHO LETU LETOUNU

Teorie popisující let letounu je poměrně obsáhlá. Letoun se pohybuje v trojrozměrném prostoru a tento pohyb lze popsat pomocí nelineárních diferenciálních rovnic. Analýza dynamického chování letounu je pak poměrně složitá. Proto se často pro tento popis používá jednodušší vyjádření, tj. popis pomocí lineárních dynamických systémů. Základním východiskem pro tuto úpravu je oddělení podélného a stranového pohybu a následná linearizace nelineárních diferenciálních rovnic popisujících tyto dva typy pohybu. Výsledkem jsou systémy lineárních (linearizovaných) diferenciálních rovnic s konstantními koeficienty [23], [24]. Tyto rovnice lze pak využít k sestavení stavového popisu linearizovaného podélného a stranového pohybu letounu.

Jelikož je tato práce zaměřena na **podélný pohyb letounu**, bude dále popsán právě tento model – viz rovnice (5), kde stavový vektor $x = [\alpha, v, \dot{v}, H, \omega]^T$. Stavovými veličinami jsou tedy úhel náběhu - α , rychlost letu - v , podélný sklon - $\dot{v}$, výška letu H a derivace podélného sklonu (úhlová rychlost) - ω . Vstupní vektor $u = [\delta_p, \delta_e]^T$, kde δ_p je tah motoru a δ_e výchylka výškového kormidla.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (5)$$

V případě uvedeného stavového popisu, kde A je systémová (zpětnovazební) matice a B je vstupní matice, se často uvažuje výstupní matice C jako jednotková a matice přímých vazeb vstupu na výstup D nulová, tj. pro výstupní vektor y potom platí, že je roven vektoru stavových veličin x , tedy $y = x$.

Dynamické vlastnosti systému (letounu) při podélném pohybu lze analyzovat na základě výpočtu vlastních čísel, resp. kořenů, λ_i systémové (zpětnovazební) matice A . V případě konvenčních letounů jsou typické dva páry komplexně sdružených kořenů a jeden reálný kořen. Komplexně sdružené kořeny reprezentují dva typy oscilací nazývané **pomalé kmity** (*long-period oscillations* nebo „phugoid“) a **rychlé kmity** (*short-period oscillations*) [25], [26]. Reálný kořen souvisí s výškou letu letounu.

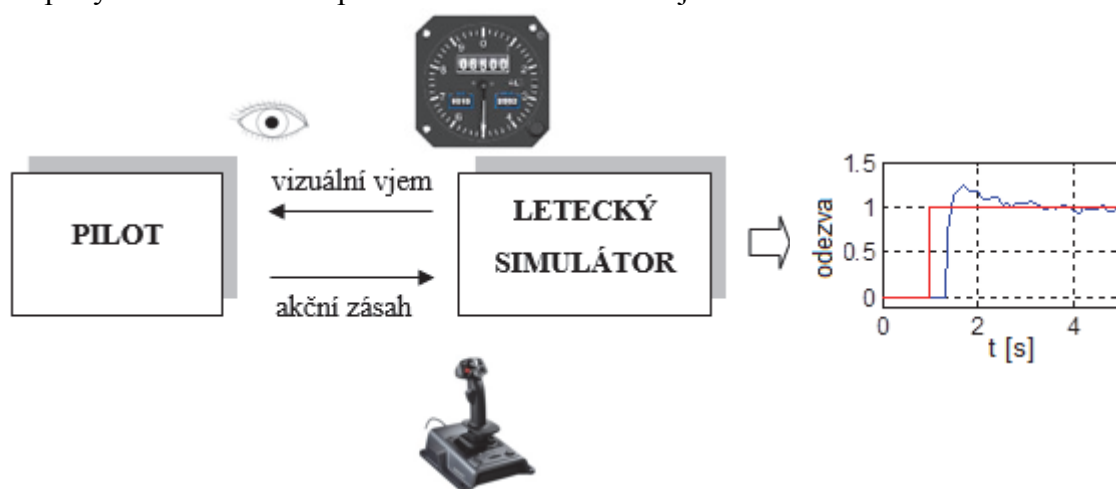
Vzhledem k tomu, že v letectví se používá častěji **angloamerická měrná soustava**, budou i v následujícím textu použity pro popis některých veličin odpovídající jednotky, tj. ft, mph, apod.

3 MMS SYSTÉM PILOT-LETOUN

Pro účely modelování a analýzy MMS systému pilot-letoun je třeba matematicky popsat obě komponenty tohoto systému, tj. vytvořit model chování pilota a model (podélného) letu letounu. Na základě těchto modelů lze pak zjednodušeně popsat interakci pilot-letoun pomocí kybernetické regulační smyčky, kde člověk – **pilot** plní funkci **regulátoru**, regulujícího **regulovanou soustavu** – **podélný let letounu**.

3.1 POUŽITÉ METODY

Pro účely modelování MMS systému pilot-letoun byla využita metoda měření odezvy pilota na vizuální vjem. Experiment je založen na měření reakce (akčního zásahu) pilota na skokovou změnu výšky letu H . V reálu by tato situace mohla nastat např. při prudkém poryvu větru při podélném pohybu letounu. Princip těchto měření demonstruje Obrázek 3.



Obrázek 3: Základní (obecný) popis experimentu měření odezvy pilota na vizuální podnět

Vzhledem k tomu, že měření a získání dat z reálného letu je poměrně problematické, je pro účely této práce využit **letecký simulátor**. Konkrétně se jedná o stacionární letecký simulátor na Univerzitě obrany v Brně vybavený softwarem X-Plane 10, jež umožňuje sběr různých letových a provozních dat s frekvencí až 20 Hz, které ukládá do textového souboru [27].

3.1.1 Měření na leteckém simulátoru

Skoková změna výšky H byla realizována jako **skok směrem dolů o 300 ft**. Tato hodnota změny byla kompromisem mezi možnou reálnou změnou způsobenou např. poryvem větru a dobře viditelnou a rozlišitelnou velikostí změny indikované pomocí výškoměru. Měření bylo provedeno s letounem King Air C90B za následujících výchozích (počátečních) podmínek:

- výchozí výška letu: $H_0 = 2900$ ft,
- výchozí rychlost letu: $v_0 = 170$ mph,
- Machovo číslo: $M_0 = 0.23$,
- výchozí hodnoty ostatních stavových veličin: $\alpha_0 \approx 0^\circ$, $\nu_0 \approx 0^\circ$, $w_0 \approx 0$ rad.s⁻¹,
- výchozí tah motoru: $\delta_{P0} = 600$ lb.

3.1.2 Identifikace

Z naměřených dat lze identifikovat parametry modelů popisujících jednak regulovanou soustavu – podélný let letounu a také regulátoru – model chování pilota. Pro účely identifikace byl využit zejména **MATLAB - System Identification Toolbox**.

Přesnost identifikace (shodu aproximace a originálu) je možné vyhodnotit na základě parametru **Best fit [%]**, který *System Identification Toolbox* počítá, viz (6), kde y je skutečná (naměřená) hodnota výstupní veličiny, y_m je modelovaná (estimovaná) hodnota výstupní veličiny a $mean(y)$ výpočet střední hodnoty naměřené výstupní veličiny.

$$Best\ fit = 100 \left(1 - \frac{\|y - y_m\|}{\|y - mean(y)\|} \right) \quad (6)$$

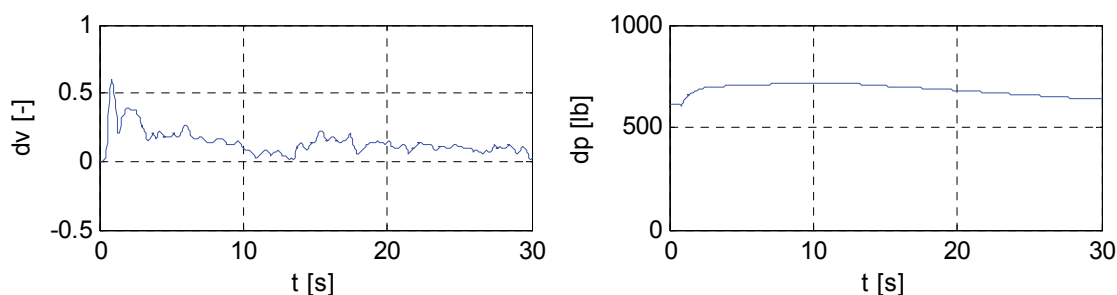
3.2 IDENTIFIKACE PARAMETRŮ REGULOVANÉ SOUSTAVY

Parametry modelu byly identifikovány na základě naměřených dat získaných pomocí výše popsaného experimentu. Jako výchozí model byl vybrán spojitý stavový model 5. řádu se dvěma vstupy ve formě rovnice (5).

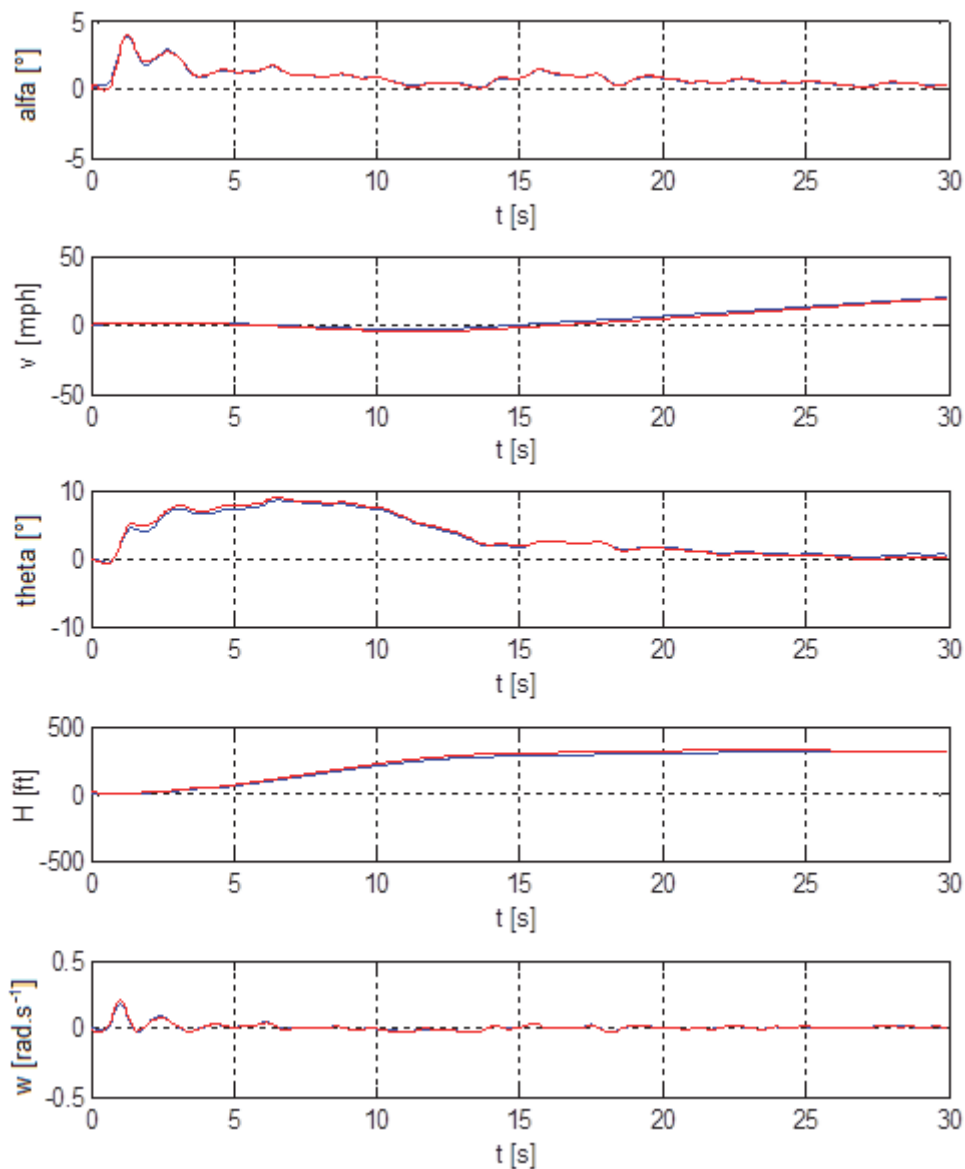
Přesnost identifikace vyjádřená parametrem *Best fit* se pro jednotlivé kombinace vstupů a výstupů (stavových proměnných) pohybovala okolo 97 %. Výsledný model je uveden v příloze dizertační práce.

Vstupní data, tj. výchylka kniplu dv a tah motoru dp jsou na Obrázek 4 a porovnání naměřených výstupních dat (průběhů stavových veličin) a odezvy jednotlivých stavů identifikovaného systému je na Obrázek 5. Modrá křivka vždy znázorňuje naměřená data a červená pak odezvu identifikovaného systému.

Z pohledu dynamických vlastností systému jsou důležité, v případě stavového popisu, kořeny charakteristické rovnice. Jak již bylo zmíněno výše, pro konvenční typy letounů jsou typické dvě dvojice komplexně sdružených kořenů reprezentující tzv. rychlé a pomalé kmity letounu a dále jeden reálný kořen. Vlastní frekvence **pomalých kmitů** (*phugoid oscillations*) je v tomto případě $\omega_{ph} = 0,103 \text{ rad.s}^{-1}$ s poměrným tlumením $\zeta_{ph} = 0,021$. Vlastní frekvence **rychlých kmitů** (*short-period oscillations*), je $\omega_{sp} = 3,88 \text{ rad. s}^{-1}$ a poměrné tlumení asi $\zeta_{sp} = 0,463$. Tyto hodnoty jsou pro konvenční letouny uvedeného typu typické [23], [25].



Obrázek 4: Naměřená (vstupní) data pro identifikaci stavového modelu podélného letu letounu

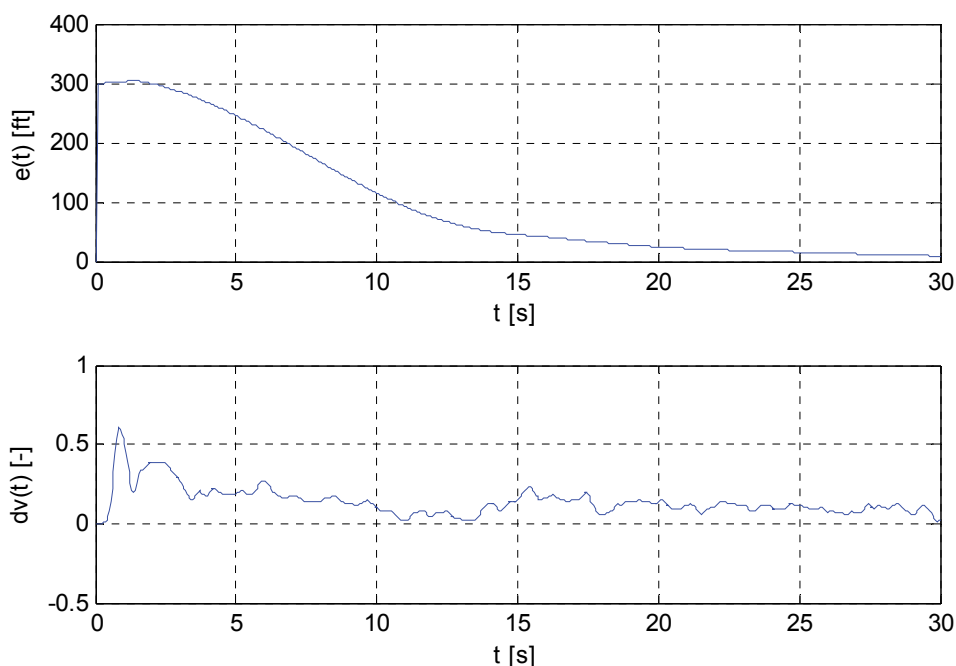


Obrázek 5: Porovnání naměřených (výstupních) dat (modře) a odezev stavových veličin identifikovaného systému (červeně)

3.3 IDENTIFIKACE PARAMETRŮ REGULÁTORU

Z naměřených dat byly identifikovány také parametry regulátoru – modelu chování pilota. Aby bylo možné vytvořit model chování pilota, bylo nutné tuto úlohu patřičně zjednodušit. Protože uvedené modely uvažují pouze **jeden vstup** a **jeden výstup**, měli piloti za úkol sledovat zejména jeden parametr letu, a sice **výšku H** , a pro řízení používat výhradně řídicí páku – **knípl (dv)**, tj. neměnit tah motoru. Pro účely popisu pilota jako regulátoru v regulační smyčce je třeba vyjádřit vstupní signál pro pilota jako rozdíl požadované - $w(t)$ a skutečné (měřené) - $H(t)$ hodnoty výšky letu, tj. regulační odchylku $e(t) = w(t) - H(t)$.

Průběhy vstupního a výstupního signálu použitých pro identifikaci parametrů modelu jsou na Obrázek 6.



Obrázek 6: Naměřená data ze simulátoru – měření odezvy pilota na skokovou změnu výšky letu letounu o 300 ft

Výchozím modelem chování pilota byla spojitá přenosová funkce se dvěma póly, jednou nulou a dopravním zpožděním, odpovídající Tustin-McRuerovu modelu, viz (4), tedy:

$$F_R(p) = K_R \cdot \frac{(T_L p + 1)}{(T_N p + 1)(T_I p + 1)} \cdot \exp(-p\tau).$$

Výsledný (identifikovaný) lineární model chování pilota je tedy v tomto případě ve tvaru:

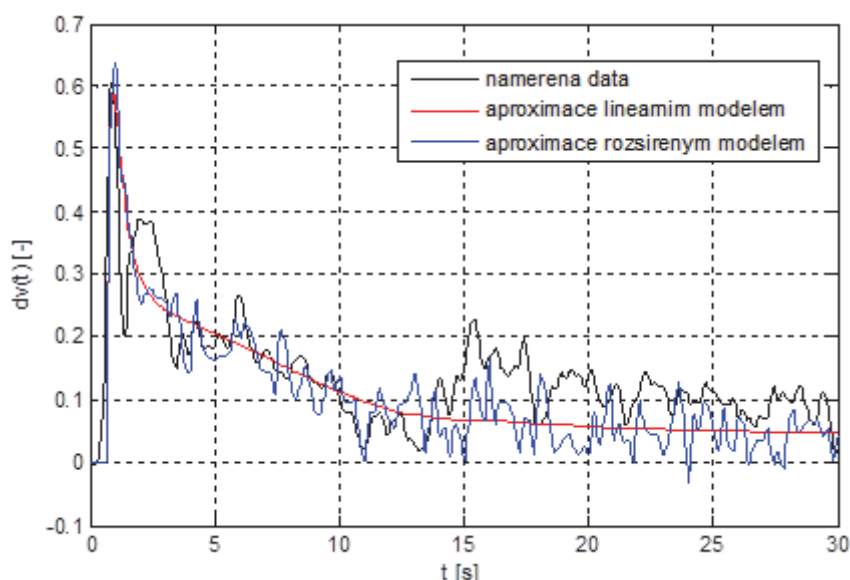
$$F_R(p) = 8.08 \cdot 10^{-4} \frac{1.29p + 1}{(0.35p + 1)(0.11p + 1)} \cdot \exp(-0.65p)$$

(Best fit = 44.12 %).

Hodnoty parametrů přenosové funkce popisující lidský regulátor spadají do intervalů uváděných v literatuře [20], [9]. Hodnota **neuromuskulární časové konstanty** T_N je **0.11 s**, **regulační konstanty** mají hodnoty $T_L = 1.29$ a $T_I = 0.35$. Hodnota **zesílení** K je poměrně malá, což je způsobeno zejména poměrem vstupního a výstupního signálu. Hodnota **reakčního zpoždění** je $\tau = 0.65$ s.

Tento model je možné dále rozšířit o další prvky zpřesňující model chování pilota, viz Obrázek 2, tj. doplnění o **pásmo necitlivosti**, jehož hodnota je zvolena jako **+/-10 ft**, **nasycení** odpovídající omezení výchylky kniplu, tedy **+/-1** a přivedení **bílého šumu**. Takovýto model je pak označen jako „**rozšířený model**“.

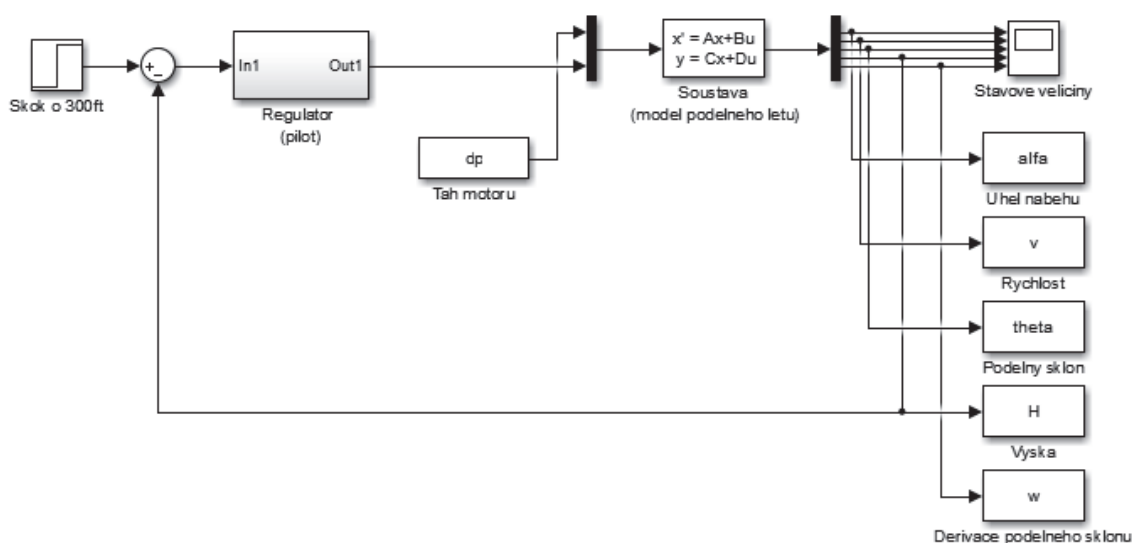
Porovnání originálních (naměřených) dat s aproximací pomocí odezvy **lineárního** a **rozšířeného modelu** na vstupní signál reprezentovaný regulační odchylkou $e(t)$ je na Obrázek 7.



Obrázek 7: Aproximace odezvy pilota na skokovou změnu výšky o 300ft pomocí lineárního a rozšířeného modelu

3.4 POPIS MMS SYSTÉMU POMOCÍ REGULAČNÍ SMYČKY

Výsledné modely popisující podélný let (regulovanou soustavu) a chování pilota (regulátor) lze nyní využít pro popis MMS systému pilot-letoun pomocí regulační smyčky, viz Obrázek 8.

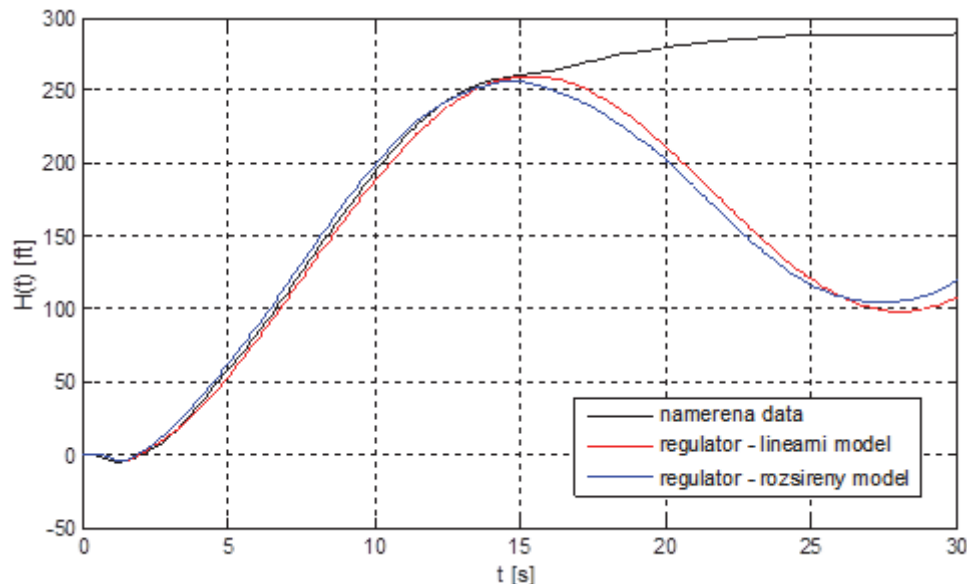


Obrázek 8: Regulační smyčka reprezentující MMS systém pilot-letoun

Soustava je reprezentována identifikovaným stavovým modelem se dvěma vstupy, kde první vstup je změna **tahu motoru** dp – zde byla přiváděna originální naměřená data ze simulátoru, a druhý vstup pak akční zásah v podobě **výchylky kniplu** dv realizované pomocí výstupu modelu chování pilota $F_R(p)$.

Za subsystém *Regulator (pilot)* byl dosazen identifikovaný model chování pilota, tj. Tustin-McRuerův model – čistě lineární ve formě rovnice (4) a dále pro srovnání rozšířený model, tedy stejný model doplněný o některé nelinearity a vliv šumu (viz Obrázek 2).

Na základě takto realizované regulační smyčky je možné analyzovat dynamické vlastnosti regulačního obvodu. V případě, že model regulátoru i soustavy je dostatečně věrný, měly by výstupní signály – zejména pak výška H , jakožto odezvy obvodu na skokovou změnu řídicí veličiny (požadované hodnoty) $w(t)$, odpovídat naměřeným hodnotám. Porovnání odezvy obvodu na skokovou změnu řídicí veličiny $w(t)$ o 300 ft a naměřených dat je na Obrázek 9. Sledovaným výstupním parametrem je **výška letu letounu H** .



Obrázek 9: Odezva regulačního obvodu na skokovou změnu požadované hodnoty výšky o 300 ft

Z uvedeného obrázku je patrné, že odezva obvodu při použití základního i rozšířeného modelu regulátoru je v časovém intervalu asi (0 – 15) s, poměrně přesná, avšak pro čas $t > 15$ s se naměřená a modelovaná odezva značně rozchází. Tento fakt souvisí s typem použitého modelu, neboť jak již bylo uvedeno v kapitole 2.2.1, McRuerovy modely jsou použitelné pro modelování dynamických vlastností člověka v okolí frekvence řezu frekvenční charakteristiky, s čímž souvisí oblast přechodného děje, a to při tzv. **kompenzačním typu řízení** (*compensatory control*). Při tomto typu řízení je hlavním úkolem pilota stabilizovat celý systém a rychle reagovat na změny vstupních signálů.

Pro úplný (komplexní) popis lidského chování je třeba doplnit základní regulační smyčku s kompenzačním regulátorem $F_R(p)$ o další typy regulátorů, které řeší ustálený stav a optimalizaci letu, tj. tzv. **sledovací regulátor** (*pursuit controller*) a **prekognitivní regulátor** (*precognitive controller*). Použitím těchto typů regulátorů je pak možné popsat chování pilota pomocí třífázového režimu letu [6]. Jednotlivé fáze tohoto modelu budou demonstrovány na uvedené ukázce modelování regulačního systému pilot-letoun (Obrázek 8).

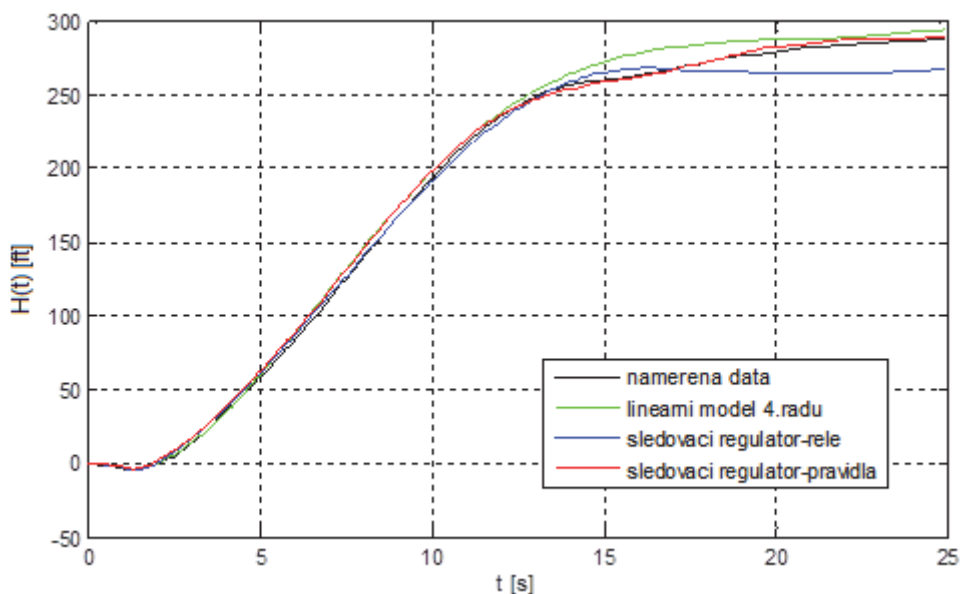
- **Fáze 1 - kompenzační režim řízení:** režim letu, kdy došlo ke skokové změně požadované hodnoty o 300 ft. Úkolem pilota je tak zejména stabilizovat celý systém a dostat se na předchozí letovou hladinu – kompenzovat regulační odchylku $e(t)$. V uvedeném případě tato fáze trvá až do času $t \approx 15$ s. Tento čas se dá považovat za dokončení přechodného děje, kdy se pilot dokázal vrátit přibližně na předchozí letovou hladinu s odchylkou asi 30 ft, tj. asi 10 % z maximální odchylky. V čase $t \approx 15$ s pak dochází k „přepnutí“ na jiný typ řízení.

- **Fáze 2 – sledovací režim řízení:** tento režim letu se dá považovat za řízení v ustáleném stavu. V uvedeném případě je to čas od $t \approx 15$ s. V této fázi letu je hlavním úkolem pilota minimalizovat odchylku od požadované hodnoty. Podle [6] je v tomto režimu chování pilota obdobné impulznímu řízení, případně tzv. **řízení založeném na pravidlech**. V některých pracích se lze setkat s dalšími variantami modelování chování pilota v tomto režimu letu. Některá řešení spočívají ve sjednocení fáze 1 a 2 a popisu chování člověka (pilota) pomocí **přenosové funkce vyššího řádu**, viz např. [28]. V tomto případě však často dochází k takovým změnám, že již z přenosové funkce není možné identifikovat např. neuromuskulární časovou konstantu a chybí tak na rozdíl od McRuerových modelů fyziologická a neurologická interpretace parametrů modelu. Další variantou, kterou lze v literatuře nalézt, je modelování 2. fáze modelem s **reléovou charakteristikou** [10].
- **Fáze 3 – prekognitivní režim řízení:** tento režim letu často nelze jednoznačně rozlišit od předchozího režimu a je tudíž poměrně náročné vytvořit model. Tato fáze navíc souvisí s vyšší úrovní řízení, tj. s kognitivním systémem člověka, který je velmi individuální a nelze tak jednoznačně zobecnit.

Na základě výše popsané problematiky modelování lidského chování pomocí třífázového režimu letu byly provedeny simulace za účelem dosažení věrnější aproximace naměřených dat. Výsledné řešení spočívalo zejména v rozšíření regulační smyčky (viz Obrázek 8) o různé varianty sledovacího regulátoru. Původní regulátor, tj. rozšířený Tustin-McRuerův model, byl postupně doplňován, případně nahrazován jednotlivými variantami modelů sledovacích regulátorů:

- regulátor ve formě **vyššího řádu přenosové funkce**,
- doplnění Tustin-McRuerova regulátoru o **sledovací regulátor s charakteristikou relé**,
- doplnění Tustin-McRuerova regulátoru o **sledovací regulátor ve formě pravidel**.

Nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití **sledovacího regulátoru ve formě pravidel**, kdy odezva regulačního obvodu byla prakticky identická s naměřeným průběhem výšky H , viz Obrázek 10. Rovněž aproximace naměřeného akčního zásahu dv realizovaného pilotem byla při použití tohoto regulátoru poměrně přesná.



Obrázek 10: Porovnání odezev obvodu pro různé varianty komplexního modelu chování pilota

4 HODNOCENÍ AKTUÁLNÍHO STAVU PILOTŮ NA ZÁKLADĚ MĚŘENÍ JEJICH REAKCÍ

Metody použité pro stavu pilota, tj. schopností a možností pilota, vychází z měření reakcí pilota na vizuální podněty. Tyto metody jsou navrženy a realizovány na základě poznatků získaných předchozími měřeními, které jsou popsány v této práci. Pro měření byl vybrán dvoumotorový vrtulový letoun King Air C90B a zvolen jeden definovaný režim letu – **vodorovný ustálený let**, kdy pilotu byla v určitém okamžiku změněna skokově výška letu o **300 ft**, tj. z původních **2900 ft** na **2600 ft**, a pilot měl za úkol co nejdříve tuto výšku korigovat zpět na 2900 ft.

4.1 PRVNÍ SADA MĚŘENÍ – ČERVEN 2015

Během první sady měření bylo provedeno měření s **8 piloty** definované výše. Každý pilot pak absolvoval **10 misí** (měření) po sobě, vždy s uvedením letounu do počátečního stavu letu. Délka mise byla vždy asi 85 s. V době tohoto testování měli piloti nalétáno cca 70 - 80 hodin.

4.1.1 Hodnocení využitím integrálních kritérií kvality

Kvantitativní ohodnocení kvality regulace (reakcí) jednotlivých pilotů je vhodné provést na základě výpočtu integrálních kritérií kvality. Pro tyto účely byly vypočteny hodnoty tří používaných kritérií, a sice modifikovaného lineárního, kvadratického a ITAE, pro jednotlivé piloty a mise. Výpočty byly realizovány na základě vztahů (7), (8) a (9):

- modifikované lineární kritérium:
$$J_{ML} = \int_0^{\infty} |e(t) - e(\infty)| dt, \quad (7)$$

- kvadratické kritérium:
$$J_{KV} = \int_0^{\infty} [e(t) - e(\infty)]^2 dt, \quad (8)$$

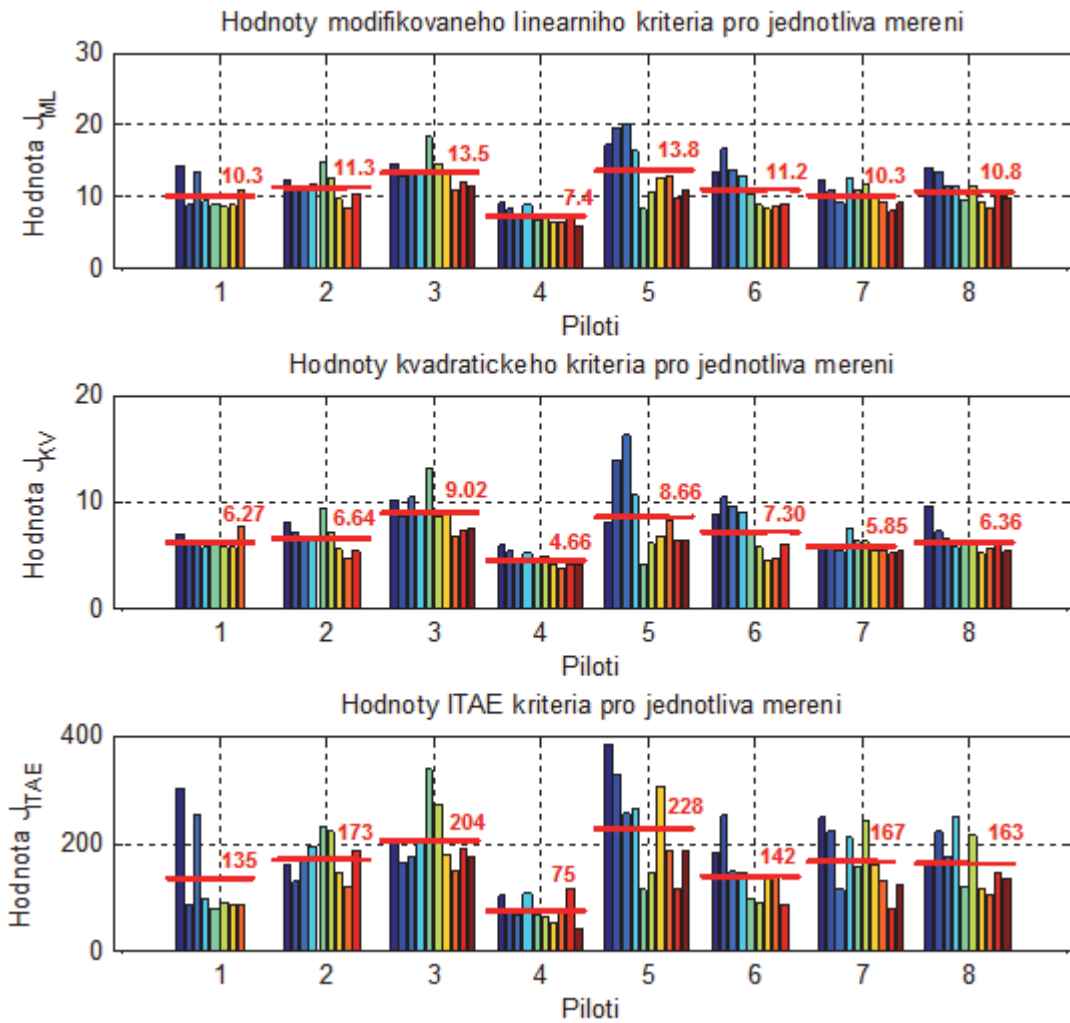
- ITAE kritérium:
$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} |e(t) - e(\infty)| \cdot t dt, \quad (9)$$

kde $e(t)$ – regulační odchylka, $e(\infty)$ – ustálená regulační odchylka, t – čas [s].

Výsledné hodnoty jednotlivých kritérií pro jednotlivé piloty a mise jsou zobrazeny pomocí grafu na Obrázek 11. Červeně jsou pak vyznačeny průměrné hodnoty kritérií pro jednotlivé piloty, získané jako aritmetický průměr z jednotlivých hodnot.

Z obrázku je patrné, že nejnižší průměrné hodnoty kritéria (ve všech případech) dosahuje Pilot_4. Z pohledu kybernetiky se tedy dá říci, že odezvy tohoto pilota vykazují charakter nejlépe nastaveného regulátoru. Navíc i hodnoty jednotlivých kritérií pro jednotlivé mise jsou v tomto případě velmi podobné.

Naopak jako nejméně kvalitní regulátor se ukazuje Pilot_5, který dosahuje ve všech případech nejvyšší průměrné hodnoty kritéria. Nicméně je vidět, že maximálních hodnot kritérií dosahuje zejména během prvních 4 misí. Výsledek se dá tedy interpretovat také tak, že mu trvalo nejdéle, adaptovat se na řízenou dynamiku.



Obrázek 11: Hodnoty integrálních kritérií kvality pro jednotlivé piloty a jednotlivé mise -první sada měření

4.1.2 Hodnocení na základě modelování lidského chování

Aktuální stav a schopnosti pilotů lze hodnotit také na základě modelování lidského chování. Protože je hlavním cílem tohoto hodnocení vyhodnotit zejména dynamické vlastnosti pilota, tj. reakční dobu pilota, rychlost dosažení požadované hodnoty, způsob adaptace na řízenou dynamiku, apod., byl jako výchozí model zvolen Tustin-McRuerův model tvaru:

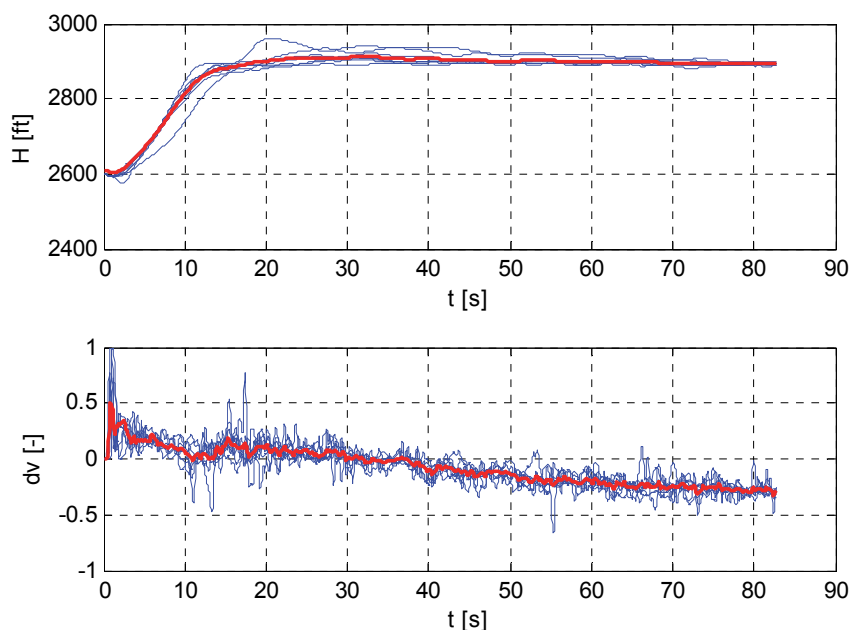
$$F_{PILOT}(p) = K \cdot \frac{T_3 p + 1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \cdot \exp(-\tau p), \quad (10)$$

kde K – zesílení (zisk) [-], T_3 – prediktivní časová konstanta [s], T_2 – setrvačná časová konstanta [s], T_1 – neuromuskulární časová konstanta [s], τ – reakční zpoždění [s], p – Laplaceův operátor.

Součástí uvedeného modelu je také neuromuskulární časová konstanta T_1 , charakterizující dynamiku neuromuskulárního systému. Její hodnota se pohybuje okolo 0.1 s, není závislá na výcviku a je pro každého pilota unikátní. V případě jednotlivých měření by tedy měla být její hodnota přibližně konstantní. Identifikační algoritmy tuto skutečnost nedokáží zohlednit, neboť pouze hledají parametry modelu tak, aby byla hodnota zvolené kritériální funkce minimální. Řešením je tedy identifikace průměrného modelu chování pilota, který vychází z identifikace

parametrů přenosové funkce ve tvaru (1) ze zprůměrovaných hodnot (odezev) a následné využití hodnoty neuromuskulární časové konstanty T_1 pro identifikace jednotlivých měření.

V následujícím textu bude pro demonstraci provedena základní analýza pro **Pilota_1**. V tomto případě bylo provedeno celkem 8 testovacích měření (misí). Zbylá dvě měření se z technických důvodů nepodařilo realizovat. Naměřená data pro Pilota_1 získaná pomocí popsáního experimentu jsou na Obrázek 12. Červená křivka v obrázcích vždy představuje aritmetický průměr z jednotlivých průběhů.



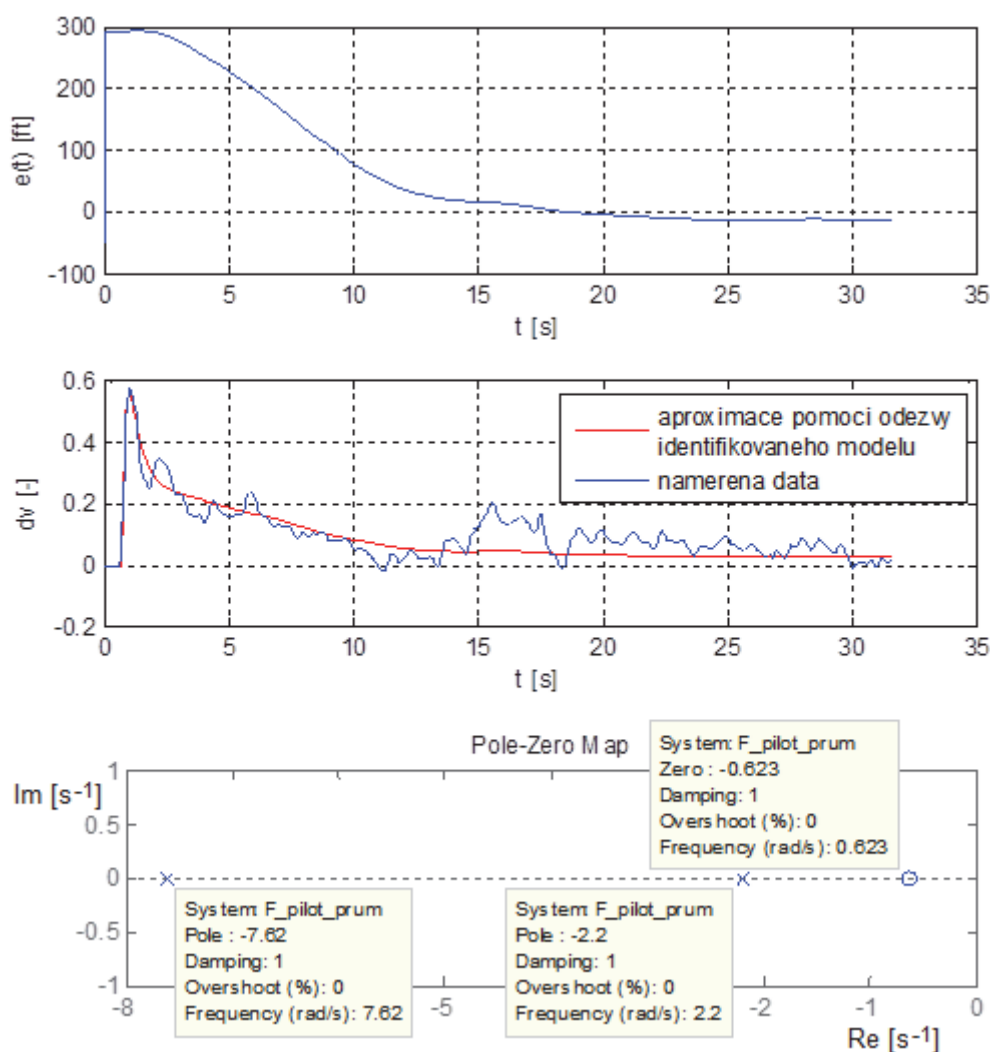
Obrázek 12: Naměřená data ze simulátoru (Pilot_1 – mise 2 až 9) – první sada měření

Z obrázku je vidět, že při prvních měřeních docházelo postupně k seznamování pilota s řízenou dynamikou, tudíž jednotlivé odezvy se poměrně liší. Jejich rozptyl od průměrné hodnoty je tedy poměrně značný. Zhruba po prvních 3 až 4 měřeních se pilot dokázal dobře adaptovat na řízenou dynamiku a rozptyl odezev již není tak značný. Tato skutečnost se dále projevila i v rozptylu identifikovaných parametrů modelu.

a) Identifikace parametrů průměrného modelu pilota

Identifikace parametrů průměrného modelu pilota vychází z identifikace zprůměrovaných odezev (červené průběhy na Obrázek 12). Aby bylo možné pilota popsat jako regulátor v regulační smyčce, je třeba zajistit, aby vstupním parametrem nebyla přímo výška $H(t)$, ale odchylka výšky $e(t)$ od požadované hodnoty $w(t) = 2900$ ft. Vstupním parametrem je tedy odchylka $e(t) = w(t) - H(t)$.

Výsledek identifikace je uveden na Obrázek 13. Hodnoty jednotlivých konstant i výsledný identifikovaný model jsou uvedeny níže.



Obrázek 13: Výsledek identifikace průměrného modelu chování Pilota_1 – první sada měření

Výsledný průměrný model chování Pilota_1 je pak:

$$F_{PILOT_1_PRUM}(p) = 6.84 \cdot 10^{-4} \frac{(1.62s + 1)}{(0.13s + 1)(0.46s + 1)} \cdot \exp(-0.7s)$$

- hodnota průměrného zesílení: $K_{prum} = 6.84 \cdot 10^{-4}$
- hodnota průměrné neuromuskulární časové konstanty: $T_{1prum} = 0.13 \text{ s}$
- hodnota průměrné setrvačné časové konstanty: $T_{2prum} = 0.46 \text{ s}$
- hodnota průměrné prediktivní časové konstanty: $T_{3prum} = 1.62 \text{ s}$
- hodnota průměrného dopravního zpoždění: $\tau_{prum} = 0.7 \text{ s}$

Přesnost identifikace: **Best fit = 47.43 %**

Identifikací průměrného modelu chování Pilota_1 byla získána hodnota neuromuskulární časové konstanty $T_{1prum} = 0.13 \text{ s}$. Jak bylo popsáno výše, jedná se o konstantu charakterizující dynamiku neuromuskulárního systému, která se nemění s výcvikem. Tuto hodnotu je tedy nyní možné využít při identifikaci parametrů modelu chování pilota pro jednotlivé mise, kde bude pro

jednotlivé modely reprezentující tyto mise pevně nastavena na uvedenou hodnotu a její hodnota tak nebude estimována.

b) Identifikace parametrů modelu chování pilota pro jednotlivé mise

Identifikovaná hodnota neuromuskulární časové konstanty T_1 je v případě pilota č. 1 $T_{1prum} = 0.1305$ s. Tuto hodnotu je nyní možné využít při identifikaci parametrů modelu chování pilota pro jednotlivá měření (mise).

Hodnoty jednotlivých identifikovaných parametrů modelu pro jednotlivé mise jsou společně se základními statistickými parametry shrnuty v Tabulka 1.

Tabulka 1: Identifikované parametry modelu chování Pilota_1 pro jednotlivé mise – první sada měření

MISE	$K \cdot 10^{-4}$ [-]	T_1 [s]	T_2 [s]	T_3 [s]	τ [s]	Best fit [%]
1	-	-	-	-	-	-
2	7.26	0.13	0.25	1.86	0.95	38.23
3	6.99	0.13	0.29	1.42	0.65	34.15
4	6.15	0.13	0.34	1.58	0.75	26.69
5	6.61	0.13	0.20	1.73	0.65	38.59
6	6.92	0.13	0.20	1.22	0.45	28.03
7	7.44	0.13	0.25	1.12	0.55	25.79
8	6.84	0.13	0.25	1.07	0.55	36.26
9	6.72	0.13	0.22	1.13	0.60	26.55
10	-	-	-	-	-	-
$\bar{x}$	6.87	0.13	0.25	1.39	0.64	VŠECHNY MISE (2-9)
s	0.40	0.00	0.05	0.30	0.15	
v_x [%]	5.78	0.00	18.88	21.58	23.44	
$\bar{x}$	6.98	0.13	0.23	1.13	0.54	MISE 6-9
s	0.32	0.00	0.02	0.06	0.06	
v_x [%]	4.55	0.00	10.65	5.52	11.71	

Z výsledků uvedených v Tabulka 1 lze vyhodnotit jednotlivé parametry pilota. **Reakční doba τ** se pohybuje v intervalu **(0.64 ± 0.15) s**. **Neuromuskulární časová konstanta T_1** byla získána identifikací zprůměrovaných odezev Pilota_1 a její hodnota je asi **0.13 s**, což odpovídá teoretickým předpokladům [9], [16], [20].

Variabilita (rozptyl) jednotlivých parametrů vyjádřená pomocí hodnot směrodatné odchylky s , resp. variačního koeficientu v_x v procentech, ukazuje, že k maximálnímu rozptylu v hodnotách identifikovaných parametrů dochází zejména během úvodních misí (1-5). Z rozptylu hodnot zesílení K a regulačních konstant T_2 a T_3 lze usoudit, že Pilot_1 se zhruba po prvních 5 misích dokázal poměrně dobře adaptovat na řízenou dynamiku a zajistit tak kvalitnější regulační pochod, což odpovídá výše diskutovanému vizuálnímu posouzení odezev a lze ověřit také z vypočtených hodnot integrálních kritérií pro jednotlivé mise.

Obdobným způsobem byla provedena analýza modelů chování pilota i pro ostatní měření pro všechny piloty. Výsledky lze nalézt v příloze originálního dokumentu.

Pro porovnání jednotlivých pilotů je vhodné porovnat např. jejich průměrné modely, resp. průměrné identifikované hodnoty jednotlivých parametrů. Tyto hodnoty byly získány jako aritmetický průměr jednotlivých identifikovaných parametrů pro jednotlivé mise pro každého z pilotů a jsou uvedeny v Tabulka 2.

Tabulka 2: Průměrné identifikované parametry modelu chování pilotů – první sada měření

Výsledná průměrná hodnota parametru					
Pilot	$K \cdot 10^{-4}$ [-]	T_1 [s]	T_2 [s]	T_3 [s]	τ [s]
Pilot_1	6.87	0.13	0.25	1.39	0.64
Pilot_2	6.41	0.13	1.26	3.34	0.71
Pilot_3	5.59	0.06	2.11	2.99	0.66
Pilot_4	7.49	0.07	1.00	3.25	0.59
Pilot_5	5.13	0.17	1.63	3.74	0.83
Pilot_6	6.57	0.12	1.42	3.21	0.63
Pilot_7	7.32	0.17	1.78	3.80	0.62
Pilot_8	7.16	0.09	1.31	4.03	0.67

Na základě těchto parametrů lze porovnat a vyhodnotit určité rozdíly v dynamickém chování jednotlivých pilotů. Z předchozích hodnocení, viz např. hodnocení pomocí integrálních kritérií kvality, byl jako nejlepší vyhodnocen Pilot_4 a naopak jako nejhorší Pilot_5. V případě těchto dvou pilotů lze pozorovat značné rozdíly i v hodnotách parametrů modelů. Zesílení K je v případě Pilota_4 asi o 30 % větší, což souvisí také s rychlostí regulace.

Neuromuskulární časová konstanta T_1 obou pilotů se pohybuje v řádu 0.1 s, což je pro člověka typická hodnota. Poměr časových (regulačních) konstant T_2 a T_3 vypovídá o určité strategii řízení a souvisí s mírou zkušeností a schopností adaptace pilota na řízenou dynamiku. Průměrná hodnota reakčního zpoždění τ se pro oba piloty také poměrně značně liší. Tato hodnota je dána dobou zaregistrování a předání informace mezi okem a mozkiem a jejím zpracováním a v případě Pilota_4 je téměř o 30 % nižší.

Společným rysem všech pilotů je způsob adaptace na řízenou dynamiku ve smyslu zákona *Crossover law*. Z poměru regulačních konstant T_2 a T_3 jednotlivých modelů, resp. pilotů, je zřejmé, že stejně jako Pilot_1 se i ostatní piloti adaptovali na řízenou dynamiku ve smyslu „lead-lag“, tj. v jejich zásahu (reakci) převažuje derivační charakter chování.

4.1.3 Hodnocení schopností pilotů na základě polohy frekvence řezu

Toto hodnocení vypovídá zejména o schopnostech pilotů z pohledu rychlosti regulace. Toto hodnocení vychází z [7] a je založeno na porovnání polohy **frekvence řezu** ω_C ve frekvenční charakteristice otevřeného regulačního obvodu $F_0(p)$ tvořeného regulátorem - pilotem $F_R(p)$ a regulovanou soustavou - dynamikou podélného letu letounu $F_S(p)$, podle:

$$F_0(p) = F_R(p) \cdot F_S(p) \rightarrow F_0(j\omega) = F_R(j\omega) \cdot F_S(j\omega)$$

Vyšší hodnota frekvence řezu ω_c znamená rychlejší regulační pochod, tzn. zjednodušeně, čím vyšší bude hodnota frekvence řezu, tím rychleji dokáže pilot regulovat, resp. dosáhnout požadované hodnoty.

Modely regulátorů $F_R(p)$ vychází z rovnice (10) s parametry uvedenými v Tabulka 2.

Model soustavy $F_S(p)$ lze z pohledu pilota pro okolí přechodného děje popsat pomocí rovnice:

$$F_S(p) = F_{S_approx}(p) = \frac{K(-T_n p + 1)}{(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)}, \text{ resp. } F_S(p) = \frac{2.52 \cdot 10^3 \cdot (-0.83 p + 1)}{(60.46 p^2 + 7.15 p + 1)}.$$

Parametry soustavy byly získány na základě průměrných hodnot získaných identifikací parametrů výše uvedeného modelu z naměřených dat pro jednotlivé piloty a mise. Hodnoty frekvence řezu pro jednotlivé piloty řídící soustavu $F_S(p)$ jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 3: Hodnoty frekvence řezu ω_c frekvenční charakteristiky otevřené smyčky pro jednotlivé piloty – první sada měření

	Pilot 1	Pilot 2	Pilot 3	Pilot 4	Pilot 5	Pilot 6	Pilot 7	Pilot 8
$\omega_c [\text{rad.s}^{-1}]$	0.191	0.195	0.175	0.212	0.174	0.195	0.210	0.214

4.2 DRUHÁ SADA MĚŘENÍ – PROSINEC 2015

Během druhé sady měření bylo opakováno měření popsané v předchozích podkapitolách za stejných výchozích podmínek. Tato měření probíhala s přibližně půlročním odstupem od první sady a **se stejnými piloty** (kromě Pilota_7). Každý pilot absolvoval **10 misí** (měření) po sobě, vždy s uvedením letounu do počátečního stavu letu. Délka mise byla vždy opět asi 85 s.

Mezi prvním a druhým měřením piloti absolvovali výcvik v rozsahu asi 20 nalétaných hodin, tzn. počet jejich nalétaných hodin se v tomto případě pohyboval v rozmezí 90 - 100 hodin.

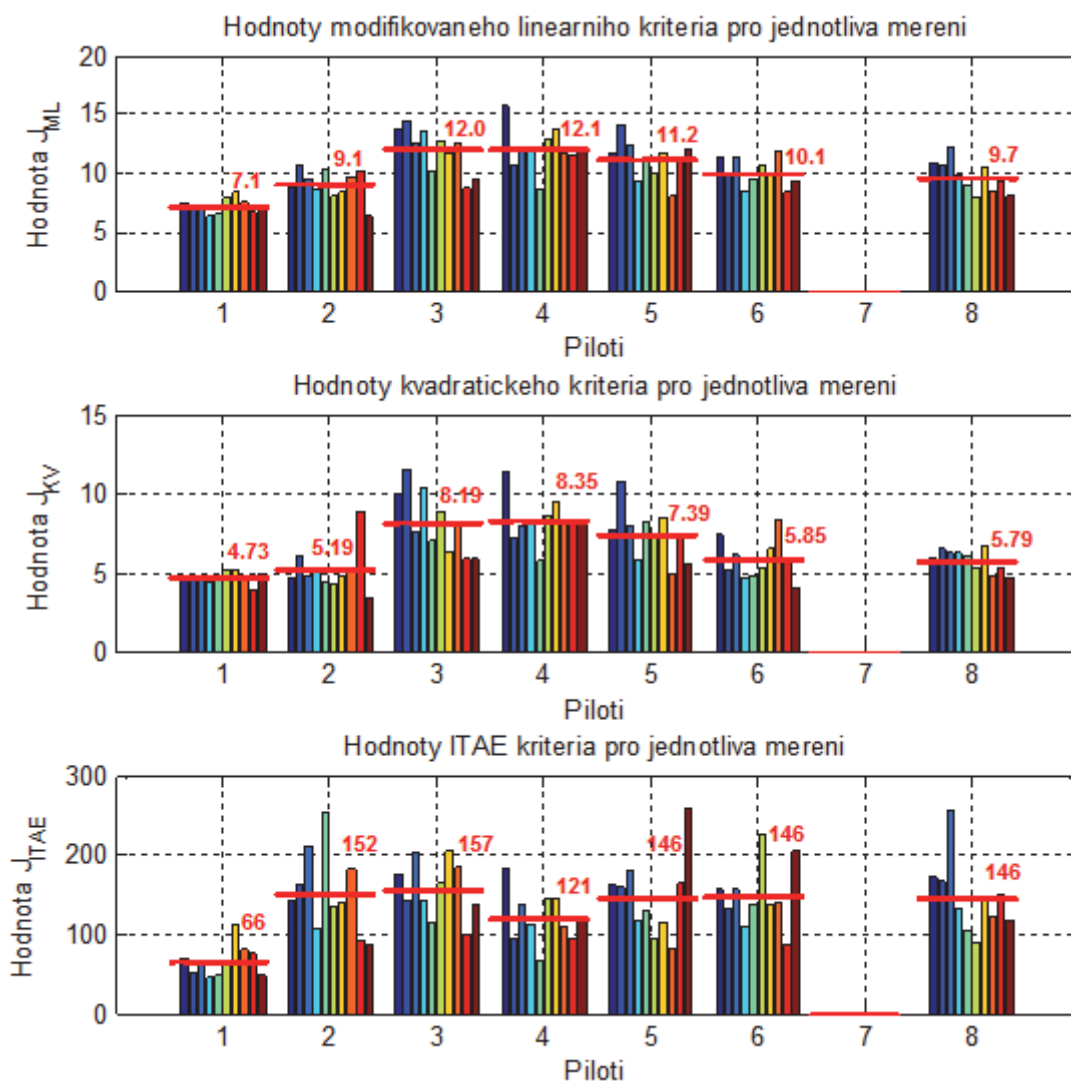
Naměřená data byla opět podrobena analýze v prostředí MATLAB. Celý proces je tedy obdobný jako v případě první sady měření.

4.2.1 Hodnocení využitím integrálních kritérií kvality

Stejně jako v předchozím případě byl na základě vztahů (7), (8), (9) proveden výpočet hodnot jednotlivých integrálních kritérií kvality regulace (modifikované lineární, kvadratické a ITAE) pro posouzení nastavení regulátoru, resp. odezvy pilota, pro jednotlivé mise. Výsledné hodnoty jednotlivých kritérií jsou graficky zobrazeny na Obrázek 14. Červeně jsou vyznačeny průměrné hodnoty kritérií pro jednotlivé piloty, získané jako aritmetický průměr z jednotlivých hodnot.

Z hodnot jednotlivých kritérií je zřejmé, že nejlepší kvality (nejnižší hodnoty kritéria) dosáhnul ve všech případech Pilot_1, tj. byl nejlépe nastaveným regulátorem.

Z pohledu hodnot modifikovaného lineárního a kvadratického kritéria byli nejméně kvalitními regulátory Pilot_3 a Pilot_4, což opět odpovídá také vizuálnímu posouzení odezev. ITAE kritérium však v případě Pilota_4 dosahuje druhé nejnižší hodnoty. To je způsobeno tím, že se jedná o kritérium váhované časem. Z časových odezev je patrné, že variabilita odezev Pilota_4 je v čase asi 40 až 85 s poměrně nízká, a dosahuje minimální odchylky od požadované hodnoty, což ovlivňuje hodnotu tohoto kritéria.



Obrázek 14: Hodnoty integrálních kritérií kvality pro jednotlivé piloty a jednotlivé mise - druhá sada měření

4.2.2 Hodnocení na základě modelování lidského chování

Proces identifikace opět probíhal na základě identifikace průměrné odezvy pilota a následně byla využita hodnota neuromuskulární časové konstanty T_{lprum} pro identifikace parametrů modelu chování pilota pro jednotlivá měření (mise). Pro tyto účely byl využit stejný model jako v předchozím případě, a sice Tustin-McRuerův model ve tvaru:

$$F_{PILOT}(p) = K \cdot \frac{T_3 p + 1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \cdot \exp(-\tau p)$$

Stejně jako v předchozím případě byla provedena analýza modelů chování pilota pro všechny piloty i mise. Výsledky lze nalézt v příloze originálního dokumentu.

Pro porovnání jednotlivých pilotů je vhodné porovnat např. jejich průměrné modely, resp. průměrné identifikované hodnoty jednotlivých parametrů. Tyto hodnoty byly získány jako aritmetický průměr jednotlivých identifikovaných parametrů pro jednotlivé mise pro každého z pilotů a jsou uvedeny v Tabulka 4.

Tabulka 4: Průměrné identifikované parametry modelu chování pilotů – druhá sada měření

Výsledná průměrná hodnota parametru					
Pilot	$K \cdot 10^{-4}$ [-]	T_1 [s]	T_2 [s]	T_3 [s]	τ [s]
Pilot_1	8.18	0.13	0.96	2.58	0.53
Pilot_2	7.19	0.14	1.56	7.34	0.65
Pilot_3	6.09	0.08	2.33	3.57	0.73
Pilot_4	5.40	0.07	1.50	2.94	0.69
Pilot_5	6.69	0.18	1.86	3.37	0.65
Pilot_6	7.15	0.12	1.28	4.50	0.61
Pilot_8	7.41	0.07	1.40	3.03	0.60

Hodnoty neuromuskulární časové konstanty T_1 se v případě všech pilotů pohybují v předpokládaných mezích uváděných v literatuře [9], [16], [20]. Dalším důležitým parametrem je průměrná hodnota doby reakce τ . Nejvyšší průměrné hodnoty dosáhl Pilot_3, a sice 0.73 s, naopak nejnižší Pilot_1, u něhož je tato hodnota asi 0.53 s. Tento výsledek souvisí také s výsledky získanými výpočtem integrálních kritérií kvality, kde byl pro tuto sadu měření vyhodnocen jako nejlepší právě Pilot_1. Tento pilot, mimo nejkratší průměrné reakční doby, disponuje také poměrně velkou hodnotou zesílení K . Naopak Pilot_3 s nejvyšší průměrnou dobou reakce τ a nejnižší hodnotou zesílení K byl pomocí integrálních kritérií kvality vyhodnocen jako jeden z nejhorších.

Z poměru regulačních konstant T_2 a T_3 jednotlivých modelů, resp. pilotů, je zřejmé, že ve všech případech opět převažuje derivační charakter chování, tj. platí $T_3 > T_2$. Tento poměr opět platí i pro jednotlivé mise.

4.2.3 Hodnocení schopnosti pilotů na základě polohy frekvence řezu

I toto hodnocení je obdobné jako v předchozím případě. **Modely regulátorů** $F_R(p)$ vychází z rovnice (10) s parametry uvedenými v Tabulka 4. **Model soustavy** $F_S(p)$ lze z pohledu pilota pro okolí přechodného děje popsat pomocí rovnice:

$$F_S(p) = F_{S_aprox}(p) = \frac{K(-T_n p + 1)}{(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)}, \text{ resp. } F_S(p) = \frac{2.57 \cdot 10^3 \cdot (-0.79 p + 1)}{(65.49 p^2 + 8.81 p + 1)}.$$

Parametry soustavy byly opět získány na základě průměrných hodnot získaných identifikací parametrů výše uvedeného modelu z naměřených dat pro jednotlivé piloty a mise. Hodnoty frekvence řezu pro jednotlivé piloty řídící soustavu $F_S(p)$ jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 5: Hodnoty frekvence řezu ω_c frekvenční charakteristiky otevřené smyčky pro jednotlivé piloty – první sada měření

	Pilot_1	Pilot_2	Pilot_3	Pilot_4	Pilot_5	Pilot_6	Pilot_7	Pilot_8
ω_c [rad.s ⁻¹]	0.198	0.244	0.168	0.156	0.179	0.201	-	0.189

5 HODNOCENÍ MÍRY VÝCVIKU PILOTŮ

Jedním z cílů této práce je ověřit možnost využití leteckých simulátorů a následné aplikace matematických metod pro objektivní posouzení míry a stavu vycvičenosti pilotů. Použité metody vychází zejména ze statistického zpracování dat získaných z měření a identifikace parametrů modelu chování pilota.

Pro tato hodnocení lze využít výsledky získané v předchozí kapitole, které vypovídají o aktuálním stavu a schopnostech pilotů z pohledu dynamických vlastností.

Celkem byly provedeny dvě nezávislé sady měření se stejnými piloty a vždy za stejných výchozích podmínek. Tato měření proběhla s půlročním odstupem, během kterého piloti absolvovali **povinný výcvik**. Naměřená data pro jednotlivé piloty a jednotlivé mise z obou provedených sad měření byla podrobena několika analýzám za účelem posouzení a ohodnocení aktuálního stavu a schopností jednotlivých pilotů, zejména pak **reakční doby, rychlosti a schopnosti adaptovat se na řízenou dynamiku, resp. schopnosti zajistit kvalitní odezvu** (kvalitní z pohledu teorie řízení).

Výsledky těchto opakovaných měření vypovídající o možnostech a schopnostech jednotlivých pilotů lze nyní využít pro zjištění změn v chování těchto pilotů zejména s ohledem právě na absolvovaný výcvik.

Z těchto porovnání je zřejmé, že ve všech případech, tj. v případě všech pilotů, došlo během této doby k určitým změnám.

Z pohledu všech hodnotících kritérií, která byla zaměřena zejména na vyhodnocení **reakční doby, rychlosti a schopnosti adaptovat se na řízenou dynamiku a schopnosti zajistit kvalitní odezvu**, došlo ve většině případů k **pozitivním změnám**. V některých případech byly tyto změny poměrně zásadní, viz např. **Pilot_1**. Hodnoty integrálních kritérií se ve většině případů snížily, což lze z pohledu kybernetiky interpretovat jako kvalitnější nastavení regulátoru pro řízenou soustavu. V případě, že regulátorem je člověk-pilot, jedná se o určitou schopnost kvalitní adaptace pilota na řízenou dynamiku. S tím souvisí i změny v podobě konstant modelu chování pilota. Průměrná doba reakce se rovněž ve většině případů snížila a rychlost regulace obecně zvýšila.

Výjimkou byl pouze jeden z pilotů, a sice **Pilot_4**. V tomto případě došlo naopak k **částečnému „zhoršení“** a to v případě všech hodnotících kritérií. Paradoxně se přitom jedná o pilota, který během první sady měření dosáhl ve všech ohledech nejlepších výsledků. Tento efekt není možné jednoznačně objasnit. Člověk je totiž poměrně komplikovaný systém a ke změnám v jeho chování může dojít vlivem různých aspektů. Jednou z možností je, že ke zhoršení jeho kvality došlo vlivem tzv. přeučení. Tento jev lze interpretovat tak, že při první sadě měření byl tento pilot již dostatečně vycvičen a vlivem dalšího výcviku mohlo dojít k částečným změnám naučených rutin a postupů či změnám v kognitivním systému. Další možnou interpretací je aktuální zhoršení stavu pilota vlivem únavy, změnou fyzické či psychické kondice, nemocí, apod.

Celkové zhodnocení pro jednotlivé piloty je pak přehledně shrnuto v následující tabulce.

Tabulka 6: Celkové zhodnocení výsledků pro jednotlivé piloty

	Kvalita odezev			Rychlost		Doba reakce
	J_{ML}	J_{KV}	J_{ITAE}	$t_w [s]^*$	$\omega_c [rad.s^{-1}]$	
Pilot_1	1. sada	10.3	6.3	134.7	15	0.182
	2. sada	7.1	4.7	65.9	12	0.206
		Výrazné zvýšení kvality odezvy ve všech případech			Zrychlení regulace	Zkrácení průměrné doby reakce
Pilot_2	1. sada	11.3	6.6	172.8	13	0.186
	2. sada	9.1	5.2	156.1	9	0.254
		Zvýšení kvality odezvy ve všech případech			Zrychlení regulace	Zkrácení průměrné doby reakce
Pilot_3	1. sada	13.5	9.0	204.5	24	0.165
	2. sada	12.0	8.2	157.0	20	0.177
		Zvýšení kvality odezvy ve všech případech			Zrychlení regulace	Prodloužení průměrné doby reakce
Pilot_4	1. sada	7.4	4.7	75.3	11	0.203
	2. sada	12.1	8.4	121.4	22	0.165
		Výrazné snížení kvality odezvy ve všech případech			Výrazné zpomalení regulace	Prodloužení průměrné doby reakce
Pilot_5	1. sada	13.8	8.7	227.9	25	0.164
	2. sada	11.2	7.4	164.4	15	0.187
		Zvýšení kvality odezvy ve všech případech			Výrazné zrychlení regulace	Zkrácení průměrné doby reakce
Pilot_6	1. sada	11.2	7.3	148.9	17	0.186
	2. sada	10.1	5.8	146.1	12	0.211
		Minimální zvýšení kvality odezvy ve všech případech			Zrychlení regulace	Zkrácení průměrné doby reakce
Pilot_8	1. sada	10.8	6.4	162.9	12	0.205
	2. sada	9.7	5.8	145.7	13	0.197
		Zvýšení kvality odezvy ve všech případech			Minimální zpomalení regulace	Zkrácení průměrné doby reakce

* t_w ... průměrná doba dosažení požadované hodnoty [s]

ZÁVĚR

Jak již bylo nastíněno v úvodu, obecně se tato práce věnuje dnes stále aktuální problematice popisu interakce systému člověk-stroj, označované také jako MMS systém. Konkrétně se zde jedná o řízení letu letounu pilotem, což je zároveň také jedna z nejsložitějších a nejkritičtějších interakcí. Pilota v interakci s letounem si lze z kybernetického pohledu zjednodušeně představit jako regulační smyčku, kde pilot představuje obecně velmi kvalitní a univerzální regulátor, neboť se dokáže adaptovat na nejrůznější situace a změny podmínek. Právě tyto schopnosti jsou do jisté míry dány zejména kvalitou výcviku a zkušenostmi, které jsou pak často rozhodujícím faktorem ovlivňujícím pilotovo chování v dané situaci. To je také jeden z důvodů, proč musí piloti, zejména pokud se jedná o vojenské piloty, absolvovat intenzivní výcvik.

V současné době se obecně výzkum v oblasti hodnocení lidského faktoru zaměřuje na získávání informací a dat pomocí simulátorů, což představuje poměrně efektivní variantu, zejména z časového a ekonomického hlediska. Právě využitím leteckého simulátoru (leteckých simulátorů) pro účely získání informací o dynamických vlastnostech člověka, o jeho aktuálním stavu a míře výcviku, se zabývá tato práce.

Pro tyto účely bylo nejprve třeba prostudovat současný stav problematiky popisu a modelování lidského chování. Vzhledem k tomu, že se jedná o poměrně komplexní problematiku, byla specifikována jedna oblast zájmu, a sice řízení podélného letu letounu. Na základě literárního průzkumu bylo zjištěno, že dosud nejpoužívanějším nástrojem pro modelování lidského chování jsou dynamické modely prof. D. T. McRuera. Podle jeho teorie člověk účelně přizpůsobuje své chování řízené dynamice, což odpovídá teorii, že se jedná o adaptivní regulátor. Z toho důvodu bylo třeba zaměřit se také na možnosti popisu řízené dynamiky – v tomto případě podélného letu letounu.

Na základě získaných teoretických poznatků pak byly v prostředí MATLAB/ Simulink vytvořeny simulační modely systému pilot-letoun pro účely získání poznatků o dynamickém chování tohoto MMS systému. Jelikož byla práce směřována na využití leteckého simulátoru, byla pro vytvoření těchto modelů využita reálná data získaná z měření aktuálních parametrů letu právě na leteckém simulátoru. Pro účely identifikace parametrů modelů byl využit jednak nástroj MATLAB – *System Identification Toolbox* a v případě parametrů pilota pak také vlastní identifikační algoritmus, vytvořený rovněž v prostředí MATLAB.

Poznatky získané uvedeným modelováním pak byly dále využity pro účely porovnání modelovaných charakteristik s průběhy získanými reálnými měřeními. Zde bylo ověřeno, že zmíněné McRuerovy modely jsou použitelné pro modelování dynamických vlastností člověka-pilota zejména v blízkém okolí oblasti přechodného děje, tj. tzv. režim kompenzačního zpětnovazebního řízení. Na základě dalších informací z literárních zdrojů pak byly navrženy a otestovány různé varianty modelů rozšiřující základní model a také varianty modelující i další režimy řízení (pilotování), zejména pak tzv. sledovací režim, kde člověk využívá také vyšší úroveň řízení. Ačkoli se podařilo pomocí přídavného „sledovacího“ regulátoru dosáhnout poměrně věrné aproximace původních (naměřených) charakteristik pro jednoho z pilotů, v případě dalších pilotů by bylo třeba provést několik modifikací. Právě v této oblasti tak spatřuji poměrně významný potenciál pro možné budoucí práce týkající se problematiky modelování lidského chování, a sice např. využití fuzzy logiky či dalších prvků umělé inteligence.

Dalším krokem bylo navrhnout a realizovat sadu experimentálních měření s reálnými piloty s využitím leteckého simulátoru za účelem získání poznatků o jejich aktuálním stavu, z pohledu dynamického chování, a způsobech a přístupech k řízení a na základě výsledků těchto experimentů dále navrhnout metodiku pro hodnocení aktuálního stavu a míry výcviku pilotů.

V tomto případě se podařilo realizovat dvě sady měření s osmi piloty s půlročním odstupem, během kterého piloti absolvovali povinný výcvik. Definice úlohy i počáteční podmínky byly v obou případech identické. Pro hodnocení schopností a možností pilotů byla navržena metoda využívající jednak předchozí získané poznatky o modelování lidského chování a dále některé metody používané v teorii automatického řízení. Na základě získaných výsledků pak byly porovnány jednotlivé provedené sady měření realizované v různých fázích výcviku.

Hodnocenými parametry byly zejména reakční doba, rychlost a schopnost adaptovat se na řízenou dynamiku a schopnost zajistit kvalitní odezvu. Z dosažených výsledků je jasně patrná změna parametrů, resp. vlastností (schopností), jednotlivých pilotů. Tyto změny byly ve většině případů pozitivní, tj. došlo ke zlepšení. Výjimkou je pouze jeden z pilotů, u kterého došlo paradoxně ke zhoršení, a to v případě všech hodnotících kritérií. Interpretace tohoto výsledku není zcela jednoznačná, neboť se může jednat o změny způsobené zhoršením zdravotního a psychického stavu nebo se může jednat o efekt tzv. přeučení. Z těchto důvodů by bylo vhodné zkombinovat popsanou metodiku s dalšími používanými testy a hodnoceními, resp. doplnit prováděná měření o měření základních biologických funkcí, jako srdeční tep, krevní tlak, apod. Tato oblast, zahrnující měření a následnou analýzu dat charakterizující aktuální stav člověka v kombinaci právě s popsanou metodou hodnocení aktuálního stavu pilotů, by mohla být předmětem dalších výzkumů v této oblasti.

Celkem bylo během provedených dvou sad měření odměřeno a analyzováno asi 160 misí realizovaných s 8 piloty vždy po 10 misích. Ačkoli získané výsledky ukazují na změny v dynamickém chování člověka - pilota v čase, jedná se z pohledu statistické významnosti zatím o poměrně malý vzorek. Pro další ověření získaných poznatků tak bude třeba provést další měření a s více piloty, což prozatím nebylo z technických a časových důvodů v rámci této práce možné. V rámci spolupráce s firmou Let'sFly s.r.o. v Mošnově jsou však již dnes postupně získávána a analyzována data z testovacích měření na jejich nově zbudovaném leteckém simulátoru, která by měla sloužit právě pro získávání nových informací z této oblasti.

LITERATURA

- [1] SHAPPELL, Scott and Cristy DETWILER. *Human Error and Commercial Aviation Accidents: A Comprehensive, Fine-Grained Analysis Using HFACS* [online]. 2006. Available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a463865.pdf>
- [2] RASMUSSEN, Jens. Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1983, vol. 13, no. 3, pp. 257–266.
- [3] HAVLÍKOVÁ, Marie. Člověk v systémech člověk-stroj. *Journal of Safety Research and Applications* [online]. 2008, vol. 3, no. 1, pp. 1–6. Available at: http://www.bozpinfo.cz/josra/josra-03-2008/havlikova_clovek_mms.html
- [4] HAVLÍKOVÁ, M. Dynamika lidského operátora v systémech MMS. *Automatizace*. 2008, p. 4.
- [5] RASMUSSEN, Jens. *Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering*. New York: North-Holland: Elsevier Science Ltd, 1986. ISBN 978-0444009876.
- [6] MCRUER, D.T. and Ezra KRENDEL. *Human Pilot Dynamics in Compensatory systems* [online]. USA: Air Force Flight Dynamics Laboratory, Research and Technology Division, Air Force Systems Command, United States Air Force, 1965. Available at: <http://contrails.iit.edu/DigitalCollection/1965/AFFDLTR65-015.pdf>
- [7] LONE, M.M., N. RUSENO and A.K. COOKE. Towards understanding effects of non-linear flight control system elements on inexperienced pilots. *The Aeronautical Journal* [online]. 2012, vol. 116, no. 1185, pp. 1201–1206. ISSN 0001-9240. Available at: doi:10.1017/S0001924000007569
- [8] FOYLE, D. C., B. L. HOOEY, M. D. BYRNE, K. M. CORKER, S. DEUTSCH, C. LEBIERE, K. LEIDEN and C. D. WICKENS. Human Performance Models of Pilot Behavior. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* [online]. 2005, p. 1109–1113. ISBN 094528926X. Available at: doi:10.1177/154193120504901202
- [9] BOŘIL, J. *Analýza mechatronické soustavy pilot-letadlo-autopilot z hlediska systémů automatického řízení*. B.m., 2013. Univerzita obrany Brno.
- [10] MCRUER, Duane T. *Pilot-Induced Oscillations and Human Dynamic Behavior* [online]. 1995. Available at: <http://hdl.handle.net/2060/19960020960>
- [11] JALOVECKÝ, Rudolf. Člověk v systému řízení letu letounu. In: Radek BYSTRICKÝ and Rudolf JALOVECKÝ, eds. *Měření, diagnostika, spolehlivost palubních soustav letadel* [online]. Brno: Univerzita obrany, 2008, p. 67–74. Available at: http://www.unob.cz/fvt/struktura/k206/Documents/veda/MDSPSL2008_Sbornik.pdf
- [12] JOHNSON, Eric N and Amy R PRITCHETT. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. In: *Elements* [online]. 2002. Available at: http://soliton.ae.gatech.edu/people/ejohnson/2002_4694.pdf
- [13] POOL, D M, P M T ZAAL, H J DAMVELD, M M Van PAASSEN and M MULDER. Pilot Equalization in Manual Control of Aircraft Dynamics. In: *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* [online]. 2009, p. 2480–2485. ISBN 9781424427949. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5346353>
- [14] SZABOLCSI, Róbert. Modeling of the human pilot time delay using Padé series. *AARMS* [online]. 2007, vol. 6, no. 3, pp. 405–428. Available at: <http://www.konyvtar.zmne.hu/docs/Volume6/Issue3/pdf/05szab.pdf>

- [15] SALEH, Louay, Philippe CHEVREL, Franck MARS, Jean-françois LAFAY and Fabien CLAVEAU. Human-like cybernetic driver model for lane keeping. In: *18th IFAC World Congress Milano* [online]. 2011, p. 4368–4373. Available at: <http://www.irccyn.ec-nantes.fr/~mars/paper/IFACWorld2011.pdf>
- [16] MCRUER, Duane T. *Mathematical Models of Human Pilot Behavior*. 1974.
- [17] LONE, Mohammad and Alastair COOKE. Pilot-model-in-the-loop simulation environment to study large aircraft dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* [online]. 2013, vol. 227, pp. 555–568. ISSN 2041-3025. Available at: doi:doi: 10.1177/0954410011434342
- [18] HESS, Ronald A. Candidate Structure for Modeling Pilot Control Behavior with Sudden Changes in Vehicle Dynamics. In: *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*. Illinois: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2009, p. 18.
- [19] HESS, Ronald A. Modeling Pilot Control Behavior with Sudden Changes in Vehicle Dynamics. *Journal of Aircraft* [online]. 2009, vol. 46, no. 5, pp. 1584–1592. ISSN 0021-8669. Available at: doi:10.2514/1.41215
- [20] HAVLÍKOVÁ, Marie. *Diagnostika systémů s lidským operátorem*. Brno: Vysoké učení technické, 2008.
- [21] QINGLING, Liu, XS TAN and M LONE. Towards the design of a pilot-induced oscillation detection and mitigation scheme. In: *AIAA Atmospheric Flight Mechanics (AFM) Conference* [online]. 2013, p. 1–19. Available at: doi:10.2514/6.2013-4605
- [22] ERTUGRUL, Seniz. Predictive modeling of human operators using parametric and neuro-fuzzy models by means of computer-based identification experiment. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* [online]. 2008, vol. 21, no. 2, pp. 259–268. ISSN 09521976. Available at: doi:10.1016/j.engappai.2007.03.007
- [23] JALOVECKÝ, R. *Palubní systémy řízení letu I*. Brno: Univerzita obrany Brno, 2008. ISBN 9788072315000.
- [24] FOSSEN, Thor I. *MATHEMATICAL MODELS FOR CONTROL OF AIRCRAFT AND SATELLITES* [online]. 2nd ed. B.m.: Department of Engineering Cybernetics, NTNU, 2011. Available at: http://www.itk.ntnu.no/fag/TTK4190/lecture_notes/2012/Aircraft_Fossen_2011.pdf
- [25] BLAKELOCK, John H. *Automatic Control of Aircraft and Missiles.pdf*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991. ISBN 0-471-50651-6.
- [26] AHMED, Umair. *3-DOF Longitudinal Flight Simulation Modeling And Design Using MATLAB / SIMULINK* [online]. B.m., 2012. Ryerson University. Available at: <http://digitalcommons.ryerson.ca/dissertations>
- [27] JALOVECKÝ, Rudolf and Jan BORIL. ANALYSIS OF MEASURED PILOT RESPONSES DURING THE FLIGHT. In: *MOSATT 2013*. 2013, p. 1–6.
- [28] HESS, Ronald A. and W. SIWAKOSIT. Assessment of Flight Simulator Fidelity in Multiaxis Tasks Including Visual Cue Quality. *Journal of Aircraft* [online]. 2001, vol. 38, no. 4, pp. 607–614. Available at: doi:10.2514/2.2836

ŽIVOTOPIS AUTORA

Osobní údaje

Jméno: Ing. Miroslav Jirgl
Datum narození: 15. 3. 1988
Adresa: Rudka 22, 664 83 Domašov, Česká republika

Vzdělání

- 2012 – dosud **Doktorský studijní program Elektrotechnika a komunikační technologie** – obor Kybernetika, automatizace a měření (Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Technická 3058/10, 616 00 Brno)
- 2010 – 2012 **Magisterský studijní program Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika** – obor Kybernetika, automatizace a měření (Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Technická 3058/10, 616 00 Brno)
- 2007 – 2010 **Bakalářský studijní program Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika** – obor Automatizace a měřicí technika (Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Údolní 53, 602 00 Brno)
- 2003 – 2007 **Střední průmyslová škola elektrotechnická** – obor Automatizace (Kounicova 16, 602 00 Brno)

Účast na projektech

- TA04031376,** Výzkum/vývoj metodiky výcviku leteckých specialistů L410 UVP - E20, zahájení: 01.09.2014, ukončení: 31.12.2017
- FEKT-S-14-2429** Výzkum nových řídicích metod, měřicích postupů a inteligentních prostředků v automatizaci, zahájení: 01.01.2014, ukončení: 31.12.2016
- FR-TI4/642,** MISE - využití moderních inteligentních MEMS senzorů pro automatizaci a bezpečnost v budovách, zahájení: 01.01.2012, ukončení: 31.12.2014
- TA02010864,** Výzkum a vývoj filtroventilační jednotky pro ochranu osob před chemickými látkami, prachem a biologickou nákazou u prostředků osobní ochrany, zahájení: 01.01.2012, ukončení: 31.12.2015

VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST - VYBRANÉ PUBLIKACE

JIRGL, M.; JALOVECKÝ, R.; BRADAC, Z. Models of pilot behavior and their use to evaluate the state of pilot training. *Journal of Electrical Engineering* – internetový časopis, (<http://iris.elf.stuba.sk/JEEEC/>), 2016, roč. 67, č. 4. ISSN: 1335-3632. (in press)

BORIL, J.; JIRGL, M.; JALOVECKY, R. Use of Flight Simulators in Analyzing Pilot Behavior. In *12th IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI 2016)*. Thessaloniki. 2016. (in press)

JIRGL, M.; JALOVECKÝ, R.; BOŘIL, J. The Identification Possibilities of the Measured Parameters of an Aircraft Model and Pilot Behavior Model on the Flight Simulator. In *Conference Proceeding of ICMT' 15*. 2015. s. 569-573. ISBN: 978-80-7231-976- 3.

JIRGL, M.; JALOVECKÝ, R.; BOŘIL, J. Metody měření lidského chování ovlivňující lidský činitel. In *Aplikace simulátorů ve výcviku leteckých specialistů*. 1. Mezinárodní letiště Ostrava, 742 51 Mošnov 403: LET'S FLY s.r.o., 2015. s. 12-24. ISBN: 978-80-260-8337- 5.

JIRGL, M.; JALOVECKÝ, R. Analysis of the Dynamic Properties of Longitudinal Flight Based on the Measurement on the Flight Simulator. *Transport Means*, 2015, č. 1, s. 290-293. ISSN: 1822- 296X.

JIRGL, M.; JALOVECKÝ, R. Parameters Identification of the Dynamic Models of Pilot Behavior. *Transport Means*, 2015, č. 1, s. 368-371. ISSN: 1822- 296X.

JIRGL, M.; JALOVECKÝ, R. Měření a hodnocení reakcí pilota. In *Sborník příspěvků 15. mezinárodní konference Měření, diagnostika, spolehlivost palubních soustav letadel 2015*. Brno: Univerzita obrany, 2015. s. 109-114. ISBN: 978-80-7231-435- 5.

JIRGL, M.; JALOVECKÝ, R. Verification of Aircraft Longitudinal Model Using Flight Simulator. *Transport Means 2014, Proceedings of 18th International Conference*, 2014, roč. 18, č. 1, s. 137-140. ISSN: 2351- 4604.

JIRGL, M.; JALOVECKÝ, R. Měření parametrů podélného letu letounu. In *Sborník příspěvků z 14. mezinárodní vědecké konference Měření, diagnostika, spolehlivost palubních soustav letadel 2014*. Brno: Univerzita obrany, 2014. s. 129-135. ISBN: 978-80-7231-970- 1.

JIRGL, M.; HAVLÍKOVÁ, M.; BRADÁČ, Z. The Dynamic Pilot Behavioral Models. In *25th DAAAM International Symposium.Procedia Engineering*. Vienna: DAAAM International Vienna, 2014. s. 1-6. ISBN: 978-3-901509-99- 5. ISSN: 1877- 7058.

JIRGL, M.; HAVLÍKOVÁ, M. Reliability Analysis of Avionic System with a Human Operator. In *Conference Proceeding of ICMT' 13*. 2013. s. 857-865. ISBN: 978-80-7231-918- 3.

HAVLÍKOVÁ, M.; ŠEDIVÁ, S.; BRADÁČ, Z.; JIRGL, M. A Man as the Regulator in Man-Machine Systems. *Advances in Electrical and Electronic Engineering* - internetový časopis, (<http://advances.utc.sk>), 2015, roč. 12, č. 5, s. 469-475. ISSN: 1804- 3119.

Abstrakt

Práce se zabývá modelováním lidského chování, resp. modelováním chování pilota, při řízení letu letounu z pohledu systémů automatického řízení. Pro tyto účely je nejprve prezentován úvod do problematiky popisu a modelování jednotlivých komponent celistvého systému pilot-letoun a na základě těchto poznatků jsou pak vytvořeny simulační modely tohoto systému získané pomocí reálně naměřených dat. Jelikož je získávání dat z reálného letu poměrně problematické, je pro účely této práce využit letecký simulátor na Univerzitě obrany v Brně. Na tomto simulátoru byla realizována řada experimentálních měření reakcí pilotů na vizuální podnět za účelem získání poznatků o jejich aktuálním stavu vycvičenosti (z pohledu dynamického chování) a dále o způsobech a přístupech k řízení. V této fázi byly realizovány dvě sady měření s 8 piloty asi s půlročním odstupem, během kterého piloti navíc absolvovali povinný letový výcvik. Během první sady měření tak byla průměrná letová praxe pilotů asi 60 hodin, během druhé sady okolo 80 hodin. Získané poznatky jsou pak dále analyzovány zejména pomocí metod používaných v teorii automatického řízení za účelem možného vyhodnocení aktuálního stavu a schopností pilotů s ohledem právě na absolvovaný výcvik.

Klíčová slova

MMS, modely chování pilota, McRuerovy modely, lidský regulátor, letecký simulátor, podélný let, model letu letounu, výcvik pilota.

Abstract

This thesis deals with human – pilot behaviour modelling during a flight in terms of automatic control systems. For these purposes, the introduction to the issue of description and modelling of individual components of the whole pilot – aircraft interaction is presented. Based on that, the simulation models obtained from real measured data are designed. However, the acquisition of the real flight data is quite difficult. Therefore, the flight simulator at Brno University of Defence is used for the purposes of this work. Several experimental measurements were taken using this simulator. These were focused on measuring pilot's reactions (responses) to visual stimulus with emphasis on obtaining judgements about their current state of training (in terms of dynamic behaviour) as well as attitude to aircraft control. In this phase, two sets of measurements with eight pilots were taken. On average, the pilots had 60 flight hours before the first set of measurements and about 80 flight hours before the second set. The obtained results are analysed using mainly the theory of automatic control approaches in order to evaluate the actual state of pilots' abilities considering the effects of flight training.

Keywords

MMS, pilot behavioural models, McRuer's models, human controller, flight simulator, longitudinal flight, flight model, pilot training.